

RAPPORT

SUR LES

TRAVAUX DU TUNNEL DU SIMPLON

COURBEVOIE
IMPRIMERIE E. BERNARD

14-15, RUE DE LA STATION

BUREAUX A PARIS : 1, RUE DE MÉDICIS

RAPPORT

SUR LES

TRAVAUX DU TUNNEL DU SIMPLON

PAR

M. JACQUIER

INGÉNIEUR EN CHEF DES PONTS ET CHAUSSÉES

(Extrait des *Annales des Ponts et Chaussées*, 4^e Trimestre 1905)



PARIS

E. BERNARD, IMPRIMEUR-ÉDITEUR

1, RUE DE MÉDICIS, 1

—

1905

RAPPORT

SUR

LES TRAVAUX DU TUNNEL DU SIMPLON

I. — HISTORIQUE SOMMAIRE DE L'ENTREPRISE DU SIMPLON.

Le tunnel du Simplon, dont les galeries de base se sont rejointes le 24 février 1905 et qui sera prochainement livré à l'exploitation, est le quatrième des grands tunnels du monde. Les trois autres sont, par ordre de date, le Mont-Cenis, le Gothard et l'Arlberg. Ces quatre ouvrages sont tous situés dans les Alpes. La carte de la Pl. 1, *fig. 1*, indique la situation respective de ces différents passages, ainsi que leur position par rapport aux voies ferrées françaises.

L'idée de percer un tunnel sous le massif du Simplon est déjà ancienne, car elle remonte à une cinquantaine d'années. Cette ancienneté s'explique par la notoriété du passage du Simplon, situé sur le trajet direct de Paris et de l'Angleterre vers Milan, et en outre par la facilité des accès de ce passage, qui permet d'y exécuter un tunnel à une altitude beaucoup plus faible que celle des autres passages des Alpes, comme le montrent les chiffres suivants :

Altitude maxima du tunnel du Mont-Cenis.	1.338 m.
» du Gothard.	1.155
» de l'Arlberg.	1.811
» du Simplon.	705

La ligne du Simplon passe ainsi à 633 mètres au-dessous de celle du Mont-Cenis, à 450 mètres au-dessous du Gothard et à 606 mètres au-dessous de l'Arlberg.

Malgré ces conditions favorables, le tunnel du Simplon se trouve être le dernier venu des grands tunnels des Alpes. Cela tient, d'une part, à ce que la longueur de cet ouvrage devait être très considérable et, d'autre part, à ce que son exécution ne se rattachait pas à des conditions politiques bien favorables. Voici les longueurs des grands tunnels des Alpes :

Mont-Cenis	12 ^k , 220
Gothard	14 , 984
Arlberg	10 , 260
Simplon	19 , 770

Quant aux conditions politiques, elles ont une très grande importance et ce sont elles surtout qui ont décidé l'exécution des tunnels antérieurs. Le Mont-Cenis doit sa réalisation au désir du Gouvernement Sarde de relier la Savoie à Turin, capitale du royaume de Sardaigne. Le Gothard a été la conséquence de la prépondérance politique acquise par l'Allemagne à la suite de la guerre de 1866 et, bien que la subvention accordée par cette puissance ait été inférieure à celle de l'Italie (40 millions contre 48), l'influence de l'Allemagne dans l'exécution de cette grande ligne internationale n'en a pas moins été prépondérante. Enfin, le tunnel de l'Arlberg a été aussi la conséquence de cette même guerre, qui a obligé l'Autriche à se créer une communication directe avec la Suisse et la France sans passer par l'Allemagne.

Ces conditions politiques favorables n'existaient pas pour le Simplon. La nouvelle ligne internationale n'intéressait directement qu'une petite partie de la Confédération, principalement les cantons de Vaud et du Valais. A la vérité, elle offrait de très grands avantages pour l'Italie, car elle était la voie la plus directe pour relier Milan à Paris et à l'Angleterre. Mais l'Italie, dont la situation financière était alors loin d'être aussi prospère qu'aujourd'hui et qui, de plus, avait fait de grands sacrifices pour la ligne du Gothard, avait déclaré, à plusieurs reprises, qu'elle ne pouvait contribuer aux frais d'établissement du tunnel du Simplon, tout en exigeant qu'une

partie notable de cet ouvrage fut située sur son territoire. Du côté de la France, il n'y avait rien à attendre. Il était bien évident, en effet, que la nouvelle ouverture projetée dans la barrière des Alpes aurait pour conséquence de favoriser le port de Gênes au détriment de celui de Marseille. Ce résultat était d'autant plus certain que la ligne du Simplon devait desservir une partie de la Suisse et de la Savoie comprise dans la zone d'influence de la ligne de Marseille à Genève. Le dommage ainsi causé au port de Marseille ne paraissait pas susceptible d'être compensé par les avantages indirects résultant, pour la France, de l'amélioration des communications avec l'Italie. Le percement du Simplon ne se présentait donc pas dans des conditions politiques favorables ; aussi les différentes Compagnies formées pour exécuter ce travail se sont-elles trouvées, jusqu'à ces dernières années, livrées à leurs seules ressources et ont échoué misérablement.

C'est au mois de janvier 1853 que remonte la première concession ; elle a été faite par le Gouvernement du Valais à des capitalistes français ayant à leur tête M. Adrien de la Valette et concernait la section du Bouveret à Sion. Cette première concession a été complétée par d'autres, émanant soit du canton de Valais, soit de l'Italie, de manière à former une ligne continue suivant la côte de Savoie du lac Léman, remontant la vallée du Rhône dans le Valais, passant en tunnel sous le Simplon et allant aboutir à Arona sur le lac Majeur. La section de la côte de Savoie est devenue française en 1860 par la réunion de cette province à la France.

En 1865, la première Compagnie du Simplon avait épuisé ses ressources et fut mise en faillite. Une seconde Compagnie, formée sur les ruines de la première, ne fut pas plus heureuse et le Conseil fédéral prononça sa déchéance en 1872. Les deux Compagnies françaises avaient construit et exploité la ligne du Simplon entre le Bouveret et Sierre, sur 80 kilomètres de longueur, et dépensé environ 40 millions.

Deux ans plus tard, en 1874, la ligne du Valais fut vendue à un Consortium formé par la Société Financière Vaudoise et la Compagnie de la Suisse Occidentale pour le prix de 10.000 francs, atteignant environ 200.000 francs avec les charges. En 1881, la nou-

velle Compagnie du Simplon, ainsi formée, fusionna avec la Compagnie de la Suisse Occidentale et constitua la *Compagnie de la Suisse Occidentale et du Simplon*, qui, à son tour, fusionna, en 1889, avec la Compagnie du Jura-Berne-Lucerne et forma la Compagnie bien connue sous le titre de Jura-Simplon. C'est cette dernière qui a eu l'honneur de mener à bien l'entreprise difficile du percement du Simplon.

De nombreux projets avaient été étudiés. Ils peuvent se diviser en trois catégories suivant que le tunnel était placé à la base, près du faite ou bien dans une situation intermédiaire. Les projets avec tunnel de base d'une longueur de 16 kilomètres au moins sont ceux de Vauthier (1860), Lommel (1864), Stockalper (1869), Clo-Favre (1875), Compagnie du Simplon (1878, 1882, 1886, 1891). Les projets avec tunnel intermédiaire sont ceux de Clo-Venetz (1857), de Bange (1886), Masson (1892). Enfin, les projets avec tunnel de faite sont ceux de Flachat (1860), Jacqmin (1860-1862), Thouvenot (1863) et Lehaitre (1863). On retrouve parmi les noms cités, ceux de plusieurs Ingénieurs français bien connus.

La Compagnie du Jura-Simplon n'avait par tardé à reconnaître que seul un tunnel de base donnait une solution satisfaisante du problème, et elle avait écarté résolument toutes les autres combinaisons. Mais les difficultés à vaincre étaient énormes. L'Italie avait, comme nous l'avons dit, déclaré qu'elle était dans l'impossibilité de contribuer à la dépense du tunnel, et l'exécution des lignes d'accès constituait déjà pour elle une lourde tâche. En France, plusieurs propositions avaient été présentées au Parlement pour obtenir l'allocation d'une subvention importante à l'entreprise du Simplon. Mais ces propositions avaient été repoussées et les discussions auxquelles elles avaient donné lieu avaient clairement démontré que tout espoir d'un concours financier de la France devait être abandonné. Malgré ces conditions si défavorables, la Compagnie du Jura Simplon ne se découragea pas et poursuivit résolument ses efforts. En 1893, elle réussit à conclure, avec MM. Brandt et Brandau, de Hambourg, associés avec les importantes maisons suisses Sulzer frères, de Winterthur, et Locker et Compagnie de Zurich, ainsi qu'avec la banque de Winterthur, un

traité à forfait pour le percement d'un tunnel de près de 20 kilomètres de longueur, comportant une dépense totale de 75 millions, non compris les intérêts intercalaires. M. Brandt était l'inventeur d'une perforatrice à pression hydraulique, qui avait été employée avec succès au percement de la partie Ouest du tunnel de l'Arlberg et plus tard au percement du tunnel de Suram, dans le Caucase. Ce traité conclu, la Compagnie du Jura-Simplon s'empressa de soumettre le projet à l'examen du Conseil fédéral, en demandant l'ouverture de négociations officielles avec l'Italie. Avant de se prononcer, le Gouvernement fédéral voulut consulter des Ingénieurs étrangers, expérimentés en matière de construction de tunnels, et choisit, pour cette mission, MM. Colombo, Ingénieur à Milan, Francis Fox, Ingénieur à Londres, constructeur du tunnel de la Mersey, et C. F. Wagner, Inspecteur des chemins de fer de l'Etat, à Vienne, ancien Ingénieur au tunnel de l'Arlberg. Le rapport des trois experts, en date du 16 juillet 1894, ayant été entièrement favorable, le Gouvernement fédéral ouvrit les négociations avec l'Italie. Des conférences techniques officieuses furent tenues à Milan, au mois de février 1895, entre les délégués du Gouvernement italien et les représentants de la Compagnie du Jura-Simplon, afin d'arrêter les bases de l'accord à intervenir entre les deux pays ; puis, une conférence diplomatique eut lieu à Berne, au mois de novembre 1895, entre les représentants officiels des deux gouvernements intéressés. Le résultat de ces pourparlers fut un traité en date du 25 novembre 1895, accordant à la Compagnie du Jura-Simplon la concession de la partie italienne du grand tunnel jusqu'à l'aiguille d'entrée de la station d'Iselle et qui fut ratifié, au mois de décembre de l'année suivante, par les pouvoirs publics de l'Italie et de la Suisse.

Le tunnel projeté devait avoir une longueur de 19^k,770, dont 9^k,106 sur le territoire suisse et 10^k,664 sur le territoire italien. Au lieu d'être exécuté avec une seule ouverture, comme les grands tunnels antérieurs, il comportait deux galeries parallèles à simple voie. D'après l'article 7 du traité international du 25 novembre 1895, l'exécution des travaux devait constituer une seule entreprise, dont le contrôle et la surveillance étaient attribués au Conseil fédéral.

Toutefois, le Gouvernement italien se réservait le droit d'approuver les plans d'exécution des travaux situés sur son territoire et de s'assurer, par des délégués techniques, de la marche régulière des travaux.

Les différentes formalités d'approbation ayant été remplies, la Compagnie du Jura-Simplon mit, le 13 août 1898, les terrains à la disposition de l'Entreprise. Cette date marque ainsi le commencement de l'exécution de ces travaux qu'il n'est pas exagéré de qualifier de gigantesques. Le traité provisoire, conclu avec l'Entreprise Brandt et Brandau, avait d'ailleurs été remplacé par un traité définitif en date du 15 avril 1898. D'après l'article 7 de ce traité, le premier tunnel devait être terminé dans un délai de cinq ans et demi, c'est-à-dire le 13 mai 1904.

Ce rapide résumé historique ne peut donner qu'une faible idée des difficultés de toute sorte qu'il a fallu vaincre pour mettre sur pied l'entreprise du percement du Simplon. Le succès de ce grand travail fait le plus grand honneur à la Compagnie du Jura-Simplon, et en particulier à M. Ernest Ruchonnet, président de la direction de cette Compagnie qui a dirigé les négociations avec une très grande habileté et une ténacité dignes d'admiration. C'est aussi un honneur pour la Confédération de n'avoir pas hésité à prendre, presque avec ses seules ressources, la responsabilité d'une œuvre aussi considérable.

On sait qu'une loi du 15 octobre 1897 a décidé le rachat des chemins de fer suisses par la Confédération. En vertu de cette loi, le réseau du Jura-Simplon a été incorporé aux Chemins de fer fédéraux à partir du 1^{er} mai 1903. Mais l'achèvement du tunnel du Simplon est resté confié à la Compagnie du Jura-Simplon en liquidation, de sorte que rien n'a été modifié dans l'organisation du personnel des travaux. Malheureusement, M. Brandt, inventeur de la perforatrice hydraulique, est mort au mois de novembre 1899, avant l'achèvement de l'œuvre, au succès de laquelle il a contribué pour une large part. M. Ruchonnet, auquel une part considérable doit être aussi attribuée, comme nous l'avons dit, dans l'entreprise du percement du Simplon, est mort au mois de juin 1904.

II. — CONDITIONS FINANCIÈRES DU PERCEMENT DU SIMPLON.

Le traité conclu en 1898 avec la Société Brandt et Brandau faisait ressortir à 75.040.000 francs, non compris les intérêts intercalaires, la dépense totale du tunnel à deux voies. Cette dépense était ainsi répartie :

1 ^{re} PÉRIODE			
<i>Construction d'un tunnel à simple voie avec galerie parallèle d'aération.</i>			
1. — Montant du forfait de l'entreprise		\$4.500.000 ^f	
2. — Travaux réservés à la Compagnie			
a). — Expropriations	310.000 ^f		
b). — Correction du Rhôno	220.000		
c). — Ligne d'accès Nord, y compris gare de Brigue	1.900.000		
d). — Matériel de voie du 1 ^{er} tunnel	640.000		
	<u>3.070.000^f</u>	3.070.000	
3. — Frais généraux de la Cie (2 0/0 sur le forfait et 5 0/0 sur le reste		4.250.000	
Total pour la 1 ^{re} période.		<u>58.820.000^f</u>	58.820.000
2 ^e PÉRIODE			
<i>Achèvement du second tunnel.</i>			
1. — Montant du forfait de l'entreprise		15.000.000 ^f	
2. — Ballastage et voie du 2 ^e tunnel		878.000	
3. — Frais généraux de la Cie (2 0/0 du forfait et 5 0/0 sur le reste		342.000	
		<u>16 220.000^f</u>	16 220.000 ^f
Total général.			<u>75.040.000^f</u>

La dépense devait être couverte en partie par des souscriptions, en partie par les ressources propres de la Compagnie du Jura-Simplon. Les souscriptions fournies par la Suisse sont les suivantes :

Confédération	4.500.000 fr.
Canton de Berne	1.000.000
» de Fribourg	2.000.000
» de Vaud	4.000.000
» du Valais	1.000.000
à reporter.	<u>12.500.000</u>

report.	12.500.000
Canton de Neuchâtel.	1.250.000
» de Genève.	1.000.000
Commune de Lausanne.	1.000.000
Cercle et Collège de Montreux	270.000
Compagnie de Navigation sur le lac Léman.	240.000
Total.	<u>16.260.000 fr.</u>

Quatre cantons possédaient des droits de retour sur des lignes faisant partie du réseau du Jura-Simplon et concédées par les gouvernements cantonaux antérieurement à la Constitution fédérale du 29 mai 1874, dont l'article 26 a placé les chemins de fer dans les attributions de la Confédération. La valeur de ces droits de retour a été évaluée, d'un commun accord, et leur montant déduit de celui des subventions promises. L'évaluation ainsi faite est la suivante :

Canton de Fribourg.	1.800.000 fr.
» Vaud.	750.000
» Neuchâtel	1.000.000
» Genève	700.000
Total.	<u>4.250.000 fr.</u>

Par suite de l'abandon de leurs droits de retour, ces quatre cantons ne devaient payer que les sommes suivantes :

Canton de Fribourg.	200.000 fr.
» Vaud.	3.250.000
» Neuchâtel	250.000
» Genève	800.000

Du côté italien, on avait compté, lors de la rédaction du traité international du 25 novembre 1895, sur une somme totale de 4 millions, à fournir par les provinces, les chambres de commerce et les Communes. Mais, après bien des efforts, on n'a pu réunir que 3.402.558 francs, dont 750.000 francs, payables par la province de Milan, 250.000 francs par celle de Gènes et 220.000 francs par celle de Novare. Cet insuccès relatif décida le Gouvernement italien à accorder une subvention de 600.000 francs afin de compléter les

quatre millions sur lesquels on comptait. L'Italie s'était d'ailleurs engagée, par le traité du 25 novembre 1895, à allouer à la Compagnie du Jura-Simplon une subvention annuelle de 66.000 francs, payable pendant 99 ans à partir de la mise en exploitation de la ligne. La valeur actuelle de cette subvention est d'environ 1.500.000 francs. L'ensemble de ces subventions s'élève ainsi à un peu moins de 22 millions, savoir :

Subventions suisses	16.260.000	
Subventions italiennes :		
1 ^o Partie payable en capital	4.002.558	} 5.502.558
2 ^o Valeur actuelle de la subvention payable par annuités	1.500.000	
Total.	21.762.558	

Pour faciliter l'allocation des subventions, la Compagnie du Jura-Simplon avait décidé que les souscripteurs recevraient des actions, dites de Subvention-Simplon, pour un capital nominal égal au montant de leurs souscriptions. Ces actions de subvention avaient droit à une part des bénéfices nets, après paiement d'un intérêt de 4,5 p. 100 aux actions privilégiées de la Compagnie et de 4 p. 100 aux actions ordinaires ; en cas de liquidation de la Compagnie, elles devaient être remboursées après les actions ordinaires. La subvention allouée par le Gouvernement italien, sous forme d'annuités, était donnée à fonds perdus et ne devait pas être représentée par des actions de subvention.

Le rachat du réseau du Jura-Simplon par la Confédération a obligé à modifier ces dispositions et le Gouvernement fédéral s'est mis d'accord, après de très longs pourparlers, avec le Gouvernement italien pour régler les conditions nouvelles résultant du rachat. Une particularité intéressante de cette convention consiste dans l'institution d'une délégation internationale, siégeant à Berne et composée de 14 membres, dont 7 nommés par la Suisse et 7 par l'Italie. Cette délégation constitue une véritable commission de contrôle.

Pour compléter ce qui concerne les conditions financières, nous

devons ajouter que le traité conclu avec l'entreprise Brandt et Brandau est un forfait rigoureux, ainsi qu'on peut en juger par l'extrait suivant de l'art. 1^{er} du cahier des charges :

« Les prix du forfait sont basés sur les propres recherches, études et calculs de l'Entreprise, la Compagnie n'assumant aucune responsabilité quelconque relativement à l'exactitude des renseignements contenus dans les différentes publications faites par elle ou par des tiers sur le projet de percement du Simplon. L'Entreprise ne pourra donc en aucun cas se prévaloir de difficultés ou d'événements imprévus qui se présenteraient en cours d'exécution des travaux pour prétendre à une augmentation des prix du forfait. »

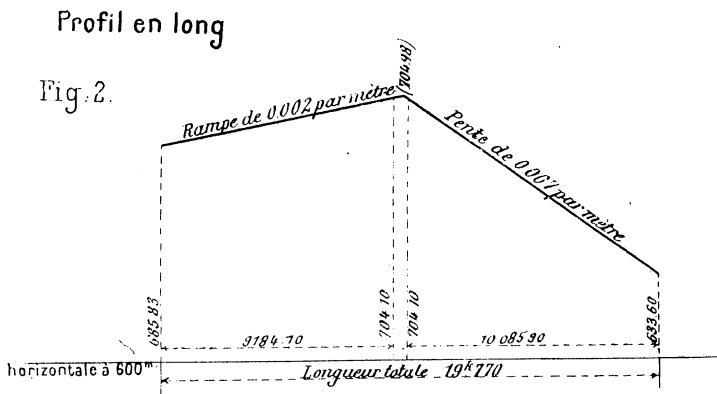
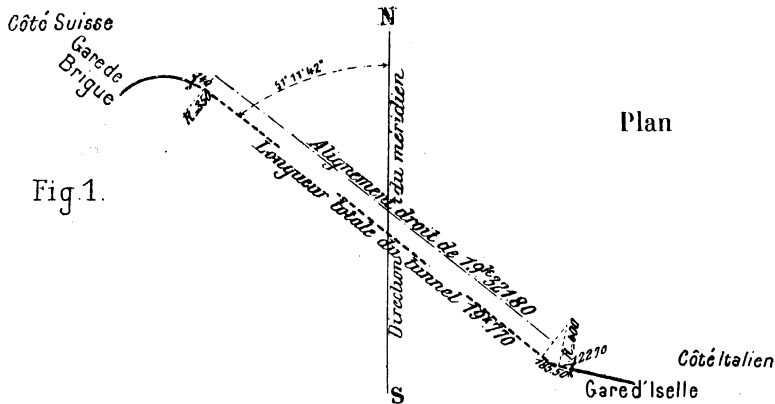
La seule atténuation admise à la rigueur du forfait vise les cas *d'une guerre dans laquelle la Suisse ou l'Italie serait engagée, des épidémies et des grèves ne provenant pas de la faute de l'Entreprise, des tremblements de terre ou d'autres cas de force majeure analogues*. Et encore cette atténuation n'est pas bien considérable, car les cas de force majeure dont il s'agit ne donnent droit, au profit de l'Entreprise, qu'à une prolongation du délai d'exécution.

Malgré cette clause rigoureuse, le Conseil fédéral a autorisé la Compagnie à allouer à l'Entreprise, en raison des difficultés exceptionnelles rencontrées dans l'exécution des travaux, diverses indemnités s'élevant à 3.897.250 francs pour la première période. Une augmentation de quatre millions environ a été en même temps accordée pour l'achèvement du second tunnel, le Conseil fédéral se réservant toutefois de confier cette partie des travaux à une autre entreprise, s'il trouvait des conditions meilleures. Ces modifications ont fait l'objet d'une convention additionnelle en date du 9 octobre 1903. Les prévisions de dépense s'élèvent ainsi à environ 83 millions.

III. — CONDITIONS TECHNIQUES GÉNÉRALES DU PERCEMENT DU SIMPLON

En plan, le tunnel est en alignement droit sur toute sa longueur, sauf aux extrémités où le tracé s'infléchit pour se raccorder avec

les lignes d'accès. Pour faciliter la vérification de l'alignement droit et éviter des déviations en cours d'exécution, la partie rectiligne du tracé est prolongée, de chaque côté, par une galerie de direction, jusqu'à la sortie de la montagne. La distance entre les têtes des deux galeries de direction est de $19^k,729^m$. Ces têtes constituent, pour chacune des attaques Nord et Sud, l'origine du kilométrage pendant la période de construction.



Nous donnons ci-dessus, (fig. 1 et 2) le plan et le profil en long du tunnel avec les raccordements prévus de chaque côté.

La longueur totale du tunnel est de $19^k,770$. Il commence, à la tête Nord, par une courbe de 350 mètres de rayon et 140 mètres de longueur; puis vient un grand alignement droit de $19^k,321.80$, auquel succède une courbe de 400 mètres de rayon et $185^m,50$ de

longueur, puis un alignement droit de 122^m,70 jusqu'à la tête Sud.

Les galeries de direction, prolongeant le grand alignement droit jusqu'à la sortie de la montagne sur chaque versant, ont 134 mètres de longueur du côté Nord et 273 mètres du côté Sud.

L'angle du grand alignement droit avec la direction N.-S. du méridien est de 51°11'42" Ouest.

Comme profil en long, le tunnel part de la cote 685^m,83 (dessus des traverses) à la tête Nord, s'élève en rampe de 0.002 sur une longueur de 9.184^m,10, est en palier de 500 mètres à la cote 704^m,10, puis descend avec une pente de 0.007 sur 10.085^m,90 de longueur, pour aboutir à la tête Sud à la cote 633^m,50. En cours d'exécution, ce profil a été légèrement modifié par la suppression du palier; la pente de 0.002 et la contrepente de 0.007 ont été prolongées jusqu'à leur rencontre et raccordées par une courbe de 10 000 mètres de rayon. L'altitude du point culminant est de 704^m,98 (*). Cette modification, admise en principe par le cahier des charges de l'entreprise, a été adoptée pour faciliter l'écoulement des eaux pendant l'exécution des travaux.

L'altitude maxima de la montagne au-dessus du tunnel est de 2.135 mètres. Se fondant sur l'expérience du percement du Gothard, on avait évalué à 40 degrés centigrades au maximum la température de la roche. Mais, comme nous le verrons plus loin, cette prévision a été dépassée de beaucoup. Nous donnons ci-après, pour servir de comparaison, l'altitude maxima de la montagne au-dessus de chacun des trois grands tunnels exécutés antérieurement dans les Alpes, ainsi que la température maxima correspondante.

	Mont-Cenis	Gothard	Arlborg
Altitude maxima de la montagne par rapport au tunnel.	1.654	1.706	720
Température maxima de la roche.	29°5	30°8	18°5

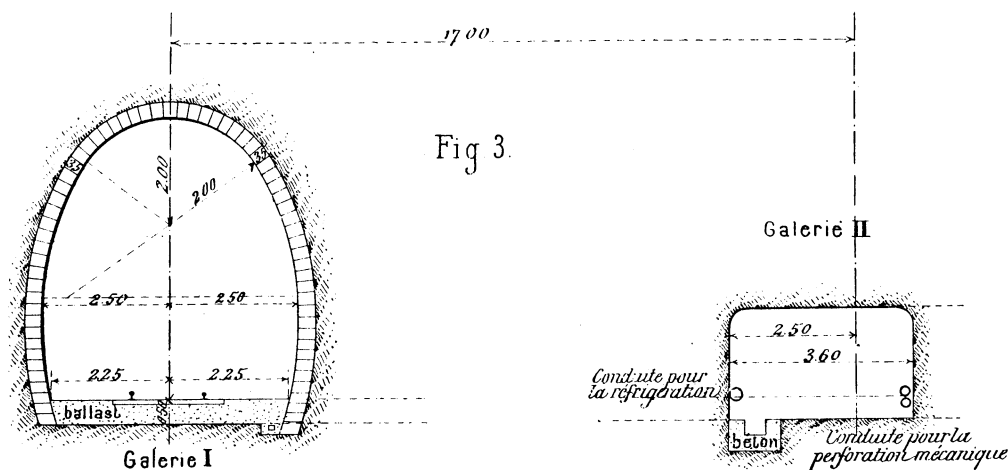
Le tunnel du Simplon comporte, comme nous l'avons dit, deux

(*) L'altitude du point culminant est abaissée de 0^m,20 par la courbe de raccordement.

galeries parallèles, qui sont distantes de 17 mètres d'axe en axe. Il sera exploité d'abord avec une seule galerie, et par conséquent avec une seule voie ; aussi, on a prévu un élargissement de la galerie N° 1 dans la partie centrale, de manière à y établir une voie de croisement de 400 mètres de longueur utile.

Les deux galeries parallèles sont reliées tous les 200 mètres, par des galeries transversales.

Tous les 50 mètres, et d'un seul côté, sont établies de petites niches de 2 mètres de largeur sur 2^m,30 de hauteur. Tous les kilo-



Profil en travers des galeries I et II.

mètres, on substitue à la niche une petite chambre de 3 mètres de largeur, 3 mètres de profondeur et 3^m,10 de hauteur, destinée à recevoir les signaux à cloche et les lampes. En outre, on a prévu l'établissement de quatre grandes chambres de 4 mètres de largeur, 6 mètres de profondeur et 3^m,10 de hauteur, destinées à recevoir les outils pour l'entretien de la voie. Ces quatre grandes chambres sont réparties à des distances égales sur la longueur du tunnel.

Le tunnel I a 4^m,50 de largeur au niveau des traverses et 5 mètres à 2 mètres au-dessus ; sa hauteur à la clef est de 5^m,50 au-dessus des traverses. La section libre est de 23^m,20. Le revêtement

a une épaisseur variable suivant la résistance de la roche rencontrée ; mais, en général, cette épaisseur est de 0^m,35.

La galerie provisoire a 3^m,40 de largeur et 2^m,40 de hauteur au-dessus des traverses dans les parties où le rocher est solide et n'exige pas de revêtement. Dans les parties avec revêtement, la largeur libre est de 3^m,20, la hauteur restant de 2^m,40.

Nous donnons, ci-contre, les profils en travers du tunnel I et de la galerie provisoire du tunnel II.

Après ces renseignements généraux sur les conditions techniques du percement du Simplon, nous allons donner quelques détails sur certains points spéciaux.

IV. — RENSEIGNEMENTS SUR CERTAINS POINTS PARTICULIERS DE L'EXÉCUTION DES TRAVAUX.

Profil géologique. — Les nombreux projets dressés en vue du percement du Simplon ont été accompagnés d'études géologiques destinées à faire connaître la nature des terrains que le tunnel projeté devait rencontrer. La première paraît être celle de H. Gerlach, auteur d'une carte géologique du Valais, publiée en 1865. Un autre géologue suisse, B. Studer, s'était occupé antérieurement de la géologie du Simplon ; mais ses recherches ne paraissent pas avoir eu pour objet le percement d'un tunnel. En 1877, la Compagnie du Simplon chargea d'une expertise géologique les professeurs E. Renouvier, de Lausanne, Ch. Lory, de Grenoble et A. Heim, de Zurich. En 1882, une seconde expertise fut faite par les mêmes géologues, assistés du professeur T. Taramelli, de Pavie. Les résultats de ces études ont fait l'objet d'un rapport inséré dans le XIX^e volume du *Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences naturelles* (1883). En 1890, une nouvelle expertise fut confiée à M. le professeur Schardt, de Montreux. Le profil géologique, dressé à cette époque par ce géologue, a fait partie du dossier fourni par la Compagnie du Jura-Simplon pour sa demande en concession, et c'est pour ce motif qu'il est quelquefois désigné sous le nom de

profil officiel. M. Schardt fut amené par des études subséquentes à modifier ses vues sur la constitution du massif du Simplon et il profita de la publication, en 1894, du *Livret guide géologique de la Suisse* pour y insérer un nouveau profil indiquant ces modifications.

En mars 1902, M. le professeur Carl Schmidt, de Bâle, remit à la Société d'entreprise du tunnel un profil géologique, basé à la fois sur ses recherches personnelles et sur les renseignements fournis par les rapports trimestriels présentés au Conseil fédéral sur l'état des travaux de percement du Simplon. Ce profil était accompagné d'un rapport exposant les vues de l'auteur sur la constitution du massif du Simplon. La publicité donnée à ce travail décida la Commission géologique du tunnel à ne pas attendre, comme elle en avait eu d'abord l'intention, l'achèvement des travaux de perforation pour publier un nouveau profil et c'est à cette circonstance que nous sommes redevables d'un mémoire fort intéressant publié par M. le professeur Schardt sur les conditions géologiques du Simplon, mémoire que la Compagnie du Jura-Simplon a fait imprimer à la fin de l'année 1903. C'est à ce mémoire que nous empruntons les renseignements sommaires que nous donnons sur la géologie du Simplon. Nous reproduisons d'abord quatre profils qui donnent une idée de la difficulté de la question.

Le premier est le profil dressé en 1890 par M. Schardt et appelé *profil officiel*; le deuxième est le profil modifié, publié en 1894 par le *Guide géologique*; le troisième est le profil de M. Schmidt, remis à l'entreprise du Simplon au commencement de l'année 1902; enfin, le quatrième est celui de M. Schardt, terminé vers le milieu de l'année 1903.

Nous compléterons les indications fournies par ces profils par quelques explications empruntées au mémoire de M. Schardt.

« Tant que l'on considérait la succession des formations, dès le
« micaschiste interposé au gneiss d'Antigorio jusqu'aux schistes
« lustrés, comme formant une série continue de terrains, proba-
« blement sédimentaires, paléozoïques ou même archéiques, la
« stratigraphie de cette région devait paraître singulièrement
« compliquée. Le retour des mêmes assises avec des contacts

PROFILS GÉOLOGIQUES

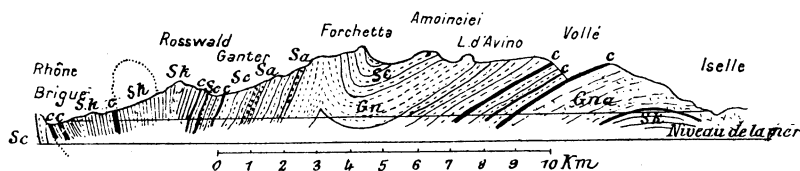


Fig. 4. — Profil dressé par M. Schardt, en 1890.

Légende : Sk, schistes lustrés ; C, calcaire, marbre, dolomite, gypse... etc.
 Sc, schistes cristallins ; Sa, schistes amphiboliques ; Gn, Gneiss ;
 Gna, Gneiss d'Antigorio.

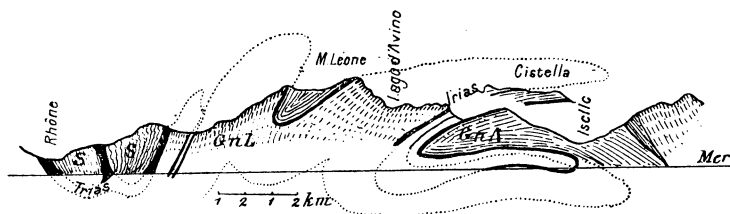


Fig. 5. — Profil dressé par M. Schardt, en 1894.

Légende : S, schistes lustrés ; GnL, Gneiss du Monte Leone ;
 Gna, Gneiss d'Antigorio.

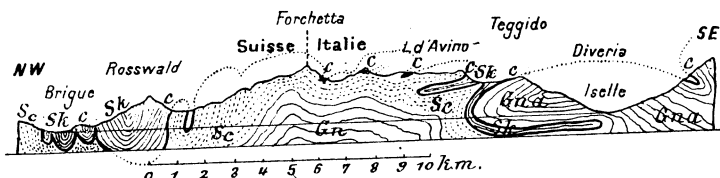


Fig. 6. — Profil dressé par M. Schmidt, au commencement de 1902.

Légende : Sk, schistes lustrés jurassiques ; c, calcaire dolomitique, anhydrite, etc..
 Trias ; Sc, schistes micacés et gneiss supérieurs ; Gn et Gna, Gneiss inférieurs et d'Antigorio.

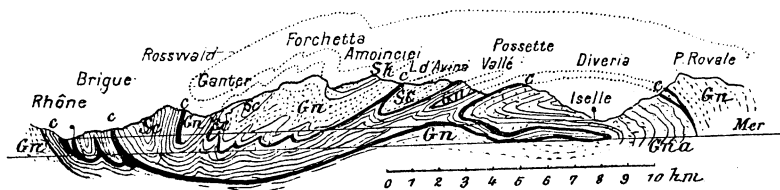


Fig. 7. — Profil dressé par M. Schardt en 1903.

Légende : Sk, schistes lustrés ; c, Trias ; Sc, schistes cristallins et amphiboliques
 Gn, Gneiss du Monte Leone ; Gna, Gneiss d'Antigorio.

« analogues à diverses reprises, relevé déjà par les experts de
« 1877 en faveur de la possibilité de l'existence de replis super-
« posés, doit être considéré comme le point de départ de la solu-
« tion du problème que recèle cette région, solution qui est d'au-
« tant plus difficile à atteindre que, les schistes lustrés exceptés
« qui contiennent des Bélemnites jusque dans le voisinage de
« l'embouchure N. W. du tunnel, aucun des terrains de ce massif
« n'a jamais fourni le moindre reste d'organisme. La distinction des
« formations doit donc se baser exclusivement sur leur caractère
« pétrographique. Si l'on considère encore que la plupart des ter-
« rains du Simplon ne présentent plus leur aspect primitif, mais
« ont subi, dans une mesure variable, l'influence du métamor-
« phisme dynamique et bathial, le problème doit paraître presque
« insoluble, car des terrains de même âge peuvent présenter un
« aspect fort différent. D'autre part, la même influence peut im-
« primer à des terrains d'origine différente un aspect très sem-
« blable. En général, la tectonique d'une région ne peut être dé-
« finie clairement avant d'en avoir établi nettement la série stra-
« tigraphique. Ici, c'est plutôt le contraire qui a lieu. Il n'a été
« possible de fixer la série stratigraphique qu'après avoir re-
« connu les allures tectoniques des terrains, qu'il s'agisse de plis
« ayant leurs points d'attache en profondeur (profil Schmidt) ou de
« plis ayant au contraire leur charnière anticlinale frontale enfon-
« cée dans le terrain ambiant plus récent (profil Schardt 1903).
« L'important est d'avoir reconnu l'existence et la position de ces
« replis. On voit, en effet, que ces deux profils en admettent sensi-
« blement le même nombre, avec les mêmes charnières renver-
« sées ; là où le premier place la racine du pli anticlinal, le second
« place la charnière, sauf pour le gneiss d'Antigorio et le pli vi-
« sible au Monte Leone (*) pour lequel M. Schmidt admet un
« renversement assez étrange et peu explicable.

« Le fil d'Ariane ayant permis de sortir de ce dédale et d'arriver

(*) Le sommet du Monte Leone se trouve à environ 1.600 mètres au S.-E. de la pointe Amoincié qui figure sur les profils géologiques. Le Stickelsgrat dont parle un peu plus loin M. Schardt se trouve à 2 kilomètres au Sud du Monte Leone. Voir d'ailleurs la carte de la Pl. 1, fig. 2.

« à en fixer les contours a été fourni par l'établissement définitif
 « de l'âge des schistes lustrés et de leur substratum, les calcaires
 « dolomitiques, gypse, anhydrites et schistes verdâtres parfois
 « accompagnés de quartzite. Les premiers sont certainement ju-
 « rassiques (Lias-Dogger) ; les derniers dans leur ensemble repré-
 « sentent le Trias. Ils reposent invariablement dans notre région
 « sur les schistes cristallins, ou directement sur le gneiss, soit
 « schisteux ou œillé, soit massif et granitoïde (Antigorio), et peu-
 « vent être considérés avec certitude comme étant partout du
 « même âge. Il y aurait ainsi la série suivante de terrains :

« Schistes lustrés, schistes calcaires, schistes granatifères, etc....
 « *Jurassique.*

« Dolomites, gypse, anhydrite, quartzites, schistes gris micacés,
 « chlorite, etc.... *Trias.*

« Schistes cristallins, micaschistes ordinaires et granatifères,
 « schistes amphiboliques, etc.... *Paléozoïque?*

« Gneiss schisteux et fibreux, gneiss œillé (gneiss du Monte
 « Leone) et gneiss massif ou granitoïde (gneiss d'Antigorio). *Ter-
 rain primitif.*

.

« La nature si particulière des calcaires dolomitiques, marbres,
 « gypse et anhydrite, leur association si régulière dans le sens
 « d'une substitution fréquente des uns par les autres, le voisinage
 « de schistes calcaires, sont des motifs pour considérer toutes les
 « zones calcaires dolomitiques ou gypsifères du massif du Sim-
 « plon comme étant d'âge triasique, d'où résulte que les micas-
 « chistes calcarifères voisins doivent être l'équivalent des schistes
 « lustrés, aussi différents, aussi gneissoïdes qu'ils soient par suite
 « du métamorphisme.

« Le point d'attache de l'application de ce principe aux diverses
 « zones calcaires du Simplon et leur explication par des replis, est
 « l'existence sur le flanc Sud-Est du Monte Leone d'un superbe
 « lacet, ayant l'aspect d'un anticlinal avec sa charnière tournée
 « vers le Sud ; celle-ci se voit nettement au Stickelsgrat. Il est
 « formé par une bande calcaire de quelques mètres d'épaisseur.
 « L'intérieur du repli est occupé par des schistes calcarifères, des

« micaschistes granatifères et des schistes verts. Comme la bran-
« che inférieure de ce long pli en V couché repose sur le gneiss
« grossier et lité du Monte Leone, de même la branche supérieure
« est surmontée de ce même terrain qui constitue le sommet du
« Monte Leone. Ce n'est donc pas un anticlinal, mais un synclinal
« ayant sa charnière tournée vers le Sud et l'ouverture au Nord
« plus basse que la première. Cette constatation que je fis positi-
« vement en août 1900, en traversant le col d'Amoinciei, entre le
« lago d'Avino et le glacier d'Aurona, est vraiment la clef de
« l'énigme de la tectonique du Simplon. Il en résulte *que ces répé-*
« *titions de bancs calcaréo-dolomitiques, associés à des schistes cal-*
« *carifères plus ou moins micacés, au milieu des masses gneissi-*
« *ques et cristallophylliennes, sont probablement aussi des synclinaux*
« *à charnière relevée au Sud et séparés par des anticlinaux culbutés*
« *de gneiss, ayant la charnière anticlinale enfoncée vers le Nord.*
« C'est le renversement de la construction précédemment admise;
« c'est en même temps une simplification considérable de la stra-
« tigraphie du massif. ».

Le quatrième profil donné ci-dessus étant à trop petite échelle pour permettre de se rendre compte de la série des formations rencontrées dans le percement du tunnel, nous joignons au présent rapport (Pl. 1) une reproduction à une échelle légèrement réduite (1 à 66.000) du profil géologique, à l'échelle de 1 à 50.000, dressé par M. Schardt. Le profil de M. Schardt étant colorié, la reproduction que nous en donnons en diffère par les signes conventionnels adoptés pour figurer les diverses natures de terrains.

Le massif du Simplon est formé principalement de schistes lustrés appartenant au terrain jurassique, ou de calcaires qui en sont l'équivalent, et de gneiss.

Les gneiss forment trois groupes principaux :

1° Le groupe du Monte Leone ;

2° Le gneiss à galets ;

3° Le gneiss d'Antigorio.

M. Schardt distingue dans le premier groupe deux divisions savoir :

a) Les micaschistes et gneiss schisteux ;

b) Le gneiss du Monte Leone proprement dit.

La série *a* est plus récente et offre l'apparence de terrains sédimentaires métamorphiques. Le problème de l'âge de ces micaschistes n'est pas résolu. Peut-être sont-ils de l'âge paléozoïque, ou même triasique.

Le gneiss du Monte Leone est grossier, schisteux ou fibreux, parfois œillé, avec zones aplitiques à grains fins, et trainées ou ségrégations basiques, micacées. Il appartient au terrain primitif.

Le gneiss à galets forme un dôme surbaissé vers les kilomètres 13 et 14. M. Schardt l'a appelé ainsi parce qu'il renferme d'innombrables noyaux lenticulaires arrondis ou en apparence même anguleux, de gneiss grossier du type d'Antigorio, gisant dans un milieu micaschisteux. Il l'assimile à un gneiss schisteux, intermédiaire entre le gneiss schisteux du Monte Leone (série *a* ci-dessus) et le gneiss massif d'Antigorio.

Le gneiss d'Antigorio est une roche qui présente souvent une texture granitoïde, quoique la texture gneissique ne fasse jamais entièrement défaut. Elle renferme des pseudo-filons (craquelures) et filons-strates plus étendus de roches basiques micacées foncées (*).

Outre ces deux groupes principaux de roches, le percement du tunnel a rencontré de nombreux bancs de dolomite, anhydrite, schiste argileux, quartzite... etc...., appartenant au trias, et qui sont nettement indiqués sur le profil géologique dressé par M. Schardt. Ces couches triasiques sont très importantes, parce qu'elles sont formées de roches susceptibles d'absorber l'eau et sont la cause des venues d'eau qui se sont produites pendant la perforation et dont nous allons parler.

Venues d'eau. — Les travaux du tunnel ont été fort gênés et retardés par les venues d'eau rencontrées. Sur le versant Sud, les quatre premiers kilomètres, situés dans le gneiss d'Antigorio, ont été remarquables par l'absence presque complète d'eau. Cette

(*) Nous avons autant que possible fait usage, dans cette description sommaire des roches rencontrées dans le percement du tunnel, des termes employés par M. Schardt.

roche n'est cependant pas imperméable ; elle présente, au contraire, d'innombrables fissures, par lesquelles l'eau peut s'introduire et circuler. Mais ces fissures sont dirigées dans tous les sens, de sorte que l'eau se trouve disséminée dans toute la masse de la roche ; de plus, elles ont une épaisseur très faible, qui ne tend pas à augmenter à cause de l'insolubilité des éléments formant le gneiss, de sorte que la circulation de l'eau ne peut se faire qu'avec une lenteur extrême. Aussi, un tunnel ne peut rencontrer des sources dans une roche de cette nature que s'il existe une couche imperméable ayant pour effet de rassembler dans des endroits déterminés l'eau disséminée dans la masse et si le tunnel vient à percer cette couche.

Si l'on examine le profil géologique, on voit qu'il existe, dans le massif du gneiss d'Antigorio, une couche de cette nature, formée par une zone de micaschiste noir. Cette zone a la forme d'un U couché sur une de ses branches ; elle a été rencontrée deux fois par le tunnel, aux points 3.650 et 3.830. Entre ces deux points, elle forme une cuvette. Si la couche dont il s'agit avait rigoureusement la forme indiquée sur le profil, on aurait dû trouver de l'eau au premier point de rencontre, et l'on n'aurait pas dû en trouver avant ce point. La masse gneissique, comprise entre les deux branches de l'U doit, en effet, contenir de l'eau, car elle est traversée par plusieurs failles amenant les eaux de la surface. En réalité, on n'a pas trouvé d'eau vers le point 3.650 ; mais on avait rencontré une série de sources dans la seconde moitié du troisième kilomètre. Ces sources n'étaient pas permanentes et ont disparu assez rapidement. Il en résulte que, dans cette partie du troisième kilomètre, la couche de micaschiste doit former une cuvette, dont les parois sont fissurées de manière à laisser passer les eaux.

L'eau n'a été trouvée en abondance qu'à partir du second point de rencontre de la couche de micaschistes, soit 3.830. Ce dernier point est l'origine d'une région aquifère d'environ 600 mètres de longueur, dans laquelle les venues d'eau ont été extrêmement abondantes, ainsi qu'on peut en juger par le tableau suivant, donnant, en litres, par seconde, le débit des eaux du tunnel pour chaque mois à partir du mois de mai 1901, date de la rencontre de

la région aquifère. On a d'ailleurs déduit le volume des eaux introduites dans le tunnel.

	1901	1902	1903	1904	1905
	—	—	—	—	—
Janvier . . .		1.050	880	772	700
Février . . .		1.017	830	734	
Mars. . . .		984	799	702	
Avril. . . .		984	766	729	
Mai	150	984	793	952	
Juin. . . .	215	1.180	1.011	1.153	
Juillet . . .	215	1.204	1.150	1.022	
Août	200	1.116	1.039	892	
Septembre . .	290	1.072	934	805	
Octobre. . .	590	1.047	866	804	
Novembre . .	1.135	940	850	800	
Décembre . .	1.149	930	798	742	
Moyenne annuelle. . .		1.042	893	842	

On voit que le débit qui était d'environ un mètre cube par seconde en moyenne en 1902, a diminué d'environ 20 p. 100 depuis cette époque. Ce débit est minimum au mois d'avril et maximum vers le mois de juillet. L'importance absolue des venues d'eau a diminué d'environ 200 litres par seconde, ce qui s'explique par la vidange de réservoirs intérieurs. Il est évident que ces eaux proviennent de l'infiltration des eaux météoriques tombant à la surface du sol dans certaines régions voisines du tunnel, et il était intéressant de déterminer quelles sont ces régions. M. le professeur Schardt a étudié spécialement cette question et a résumé ses observations et avis dans deux mémoires fort importants en date de février 1902 et août 1903.

Une première source d'infiltrations est évidente : c'est la vallée sèche de l'Alpe di Vallé, dont le versant Sud-Est est formé de calcaires susceptibles d'absorber une forte proportion des eaux pluviales, et dont le versant Nord-Ouest, formé de roches schisteuses peu perméables, présente une pente raide, de sorte que les eaux qui tombent sur ce versant descendent vers le fond de la vallée et sont en partie absorbées, elles aussi, par le calcaire. L'examen du profil géologique permet de se rendre compte de cette disposition. On voit, en outre, que les couches calcaires perméables enveloppent

le massif de gneiss d'Antigorio comme d'une calotte et viennent passer au-dessous en coupant le tunnel vers le milieu du cinquième kilomètre. Les eaux absorbées par ces couches pénètrent en partie dans le gneiss sous-jacent ; mais elles ne peuvent dépasser la zone de micaschiste noir qui se trouve à l'intérieur du massif de gneiss. Les eaux de la surface sont ainsi conduites et concentrées dans la région qui s'étend depuis le point de 3^k,830, où le tunnel sort du micaschiste, jusqu'au point 4^k,500 environ, où finit le calcaire, et qui a environ 600 mètres de longueur.

M. Schardt a cherché à délimiter le champ collecteur des eaux pénétrant ainsi dans le tunnel, et il évalue la superficie de ce champ à 10 kilomètres carrés environ. Admettant une hauteur annuelle de chute de 2 mètres et un coefficient d'absorption des $\frac{2}{3}$, il trouve un débit de 500 litres environ par seconde, soit la moitié seulement du débit moyen observé. Il en conclut qu'il doit exister une autre source d'infiltration, et il croit que c'est le ruisseau de la Cairasca qui la fournit. L'extrait de carte de la Pl. 1 (*fig. 2*), montre quelle est la position de ce cours d'eau par rapport au tunnel.

M. le Professeur Schardt a fait divers essais de coloration avec de la fluorescéine. Un premier essai, effectué le 3 décembre 1901, avait donné un résultat négatif attribué, par l'auteur des expériences, à la trop faible quantité de matière colorante employée et surtout à la trop courte durée du prélèvement des échantillons. Un nouvel essai, exécuté à la même date de l'année suivante avec une plus grande quantité de matière colorante, et pendant plus longtemps, a permis de constater une coloration très nette des eaux du tunnel. Un troisième essai, effectué le 2 avril 1903, au moment où les eaux de la Cairasca étaient très basses, a donné un résultat négatif. Enfin, un quatrième essai, pratiqué le 9 juin 1903, à un moment où le torrent était en forte crue, a donné une coloration sensible, quoique très faible, provenant sans doute de l'abondance des eaux de la rivière.

Ces expériences prouvent donc qu'une partie des eaux superficielles de la vallée de la Cairasca pénètre jusqu'au tunnel, sauf au moment des basses eaux.

Il nous paraît cependant difficile d'admettre que cette seconde

cause puisse fournir un débit d'environ 500 litres par seconde, c'est-à-dire avoir autant d'importance que les infiltrations provenant de la vallée sèche de l'Alpe di Vallé, située directement au-dessus du parcours du tunnel, dans des conditions beaucoup plus favorables pour que les eaux arrivent jusqu'à cet ouvrage. Les calculs faits pour déterminer le débit provenant de ces dernières infiltrations ne peuvent prétendre à une grande exactitude. Il est possible que la superficie du champ collecteur soit plus considérable que ne l'a admis M. Schardt, et de plus, il ne serait pas étonnant que la hauteur annuelle des précipitations météoriques dépassât 2 mètres, car, outre les eaux fournies par les chutes de pluie et de neige, il se produit pendant l'été, sous forme de rosée, des précipitations abondantes qui doivent augmenter sensiblement cette hauteur. Enfin, comme nous l'avons fait remarquer, l'importance des venues d'eau diminue encore, ce qui prouve que la vidange de l'eau accumulée dans les innombrables fissures du terrain n'est pas terminée et conduit à admettre que le débit moyen des eaux permanentes est notablement inférieur à celui d'un mètre cube, qui a été admis. Cette conclusion est confirmée par les débits moyens annuels, qui sont de 1.042 litres pour 1902, 893 pour 1903 et 842 seulement pour 1904.

Les infiltrations des eaux superficielles suivent divers chemins pour arriver jusqu'au tunnel. Les unes, et ce sont les plus abondantes, arrivent directement et rapidement à travers le calcaire ; elles sont froides et ont produit un refroidissement notable de la roche jusqu'à une distance assez considérable autour de la région aquifère. Les autres descendent plus bas que le niveau du tunnel et remontent ensuite par un effet de siphonnement ; elles sont plus chaudes que le rocher. Enfin, d'autres sources ont sensiblement la température de la roche ; elles sont constituées en partie par des fuites du premier groupe, en partie par des eaux indépendantes provenant du gneiss.

Les énormes quantités d'eau rencontrées dans la région aquifère et le défaut de consistance des roches à travers lesquelles ces eaux s'écoulaient ont, il est à peine besoin de le dire, retardé considérablement l'exécution du tunnel. Les travaux de perforation méca-

nique ont dû être à peu près complètement suspendus du 30 septembre 1901 au 20 mai 1902, soit pendant près de huit mois ; on n'a effectué, pendant ce temps, que 31 mètres d'avancement de la galerie de base, dont 19 mètres mécaniquement et 12 mètres à la main. Un second arrêt de trois mois et demi, de 6 septembre au 19 décembre 1904, a été causé par la rencontre d'une source chaude au point 9110.

Sur le versant Nord, la roche a été en général sèche. Dans la traversée des schistes lustrés, jusqu'au point 3.843, on a cependant rencontré deux régions aquifères, la première vers le milieu du troisième kilomètre et la deuxième vers la fin de ce même kilomètre. Le débit des eaux a été d'environ 8 litres par seconde pour la première région et de 40 litres pour la seconde. Les zones de calcaire rencontrées entre 3^k,843 et 4^k,080 n'ont pas fourni d'eau, ce qui tient à ce que ces couches, étant verticales, présentent une section superficielle peu étendue, et de plus à ce que la pente du terrain est forte. On voit facilement, en examinant le profil géologique, que les conditions sont très différentes de celles qui se présentent dans la vallée sèche de l'Alpe di Vallé et qui ont produit les énormes venues d'eau du versant Sud.

La traversée du massif gneissique du Monte Leone a été remarquablement sèche. On a rencontré quelques sources à la rencontre du terrain triasique, qui s'enfonce dans le gneiss sur la première moitié du neuvième kilomètre, comme le montre le profil géologique ; une source trouvée au point 8^k,490 a un débit de 2 litres par seconde. Ces sources sont chaudes ; cette dernière avait une température de 54 degrés.

Vers le point 9^k,400, le tunnel a pénétré dans le terrain triasique, consistant d'abord en micaschistes gris ou blancs, suivis de calcaires dolomitiques jusqu'au point 9^k,680, où l'on a rencontré des calcaires grenus, bien lités, plus ou moins micacés, qui sont l'équivalent des schistes lustrés calcarifères (jurassique). Dès le point 9^k,850, le calcaire cristallin clair prédomine et tend de plus en plus à prendre l'aspect d'un marbre saccharoïde formé de carbonate de chaux presque pur. Cette région a fourni des sources chaudes assez abondantes, mais dont le volume a diminué rapidement ; leur

température a varié de 52 à 48 degrés. Ces sources contenaient beaucoup de gypse ; mais leur dureté, qui atteignait d'abord 170 degrés, a diminué en même temps que leur volume. Il en a été de même de la température. Cette diminution du débit, de la dureté et de la température indique un phénomène de vidange des canaux souterrains.

La rencontre de ces sources chaudes a apporté une grande gêne à l'exécution des travaux. Pour faciliter l'écoulement des eaux, l'avancement a été continué en rampe de 15 p. 1000 depuis le sommet du profil en long, au point 9^k,573, jusqu'à 9^k,979 où le faite s'est trouvé atteint, en tenant compte de la hauteur à réserver pour la galerie d'avancement. De ce dernier point on est redescendu avec une contrepente de 25 p. 1000 pour arriver à la hauteur normale du seuil du tunnel (*). Malheureusement, le 21 novembre 1903, au point 10.144, on a rencontré une nouvelle source d'eau chaude d'un débit de 50 litres par seconde, qui a obligé à suspendre les travaux jusqu'au 20 mars 1904.

Repris à cette dernière date, les travaux ont dû être arrêtés de nouveau, et cette fois d'une manière définitive, le 18 mai, par suite de la rencontre, au point 10^k,376, d'une source d'eau chaude d'un débit de 35 litres par seconde. L'eau motrice n'était plus suffisante pour assurer à la fois l'évacuation des eaux dans la galerie en contrepente et la réfrigération ; c'est ce qui a nécessité l'arrêt définitif des travaux d'avancement du côté Nord. Les deux portes de sûreté, qui avaient été établies au point 10^k,129 de la galerie I et au point 10^k,112 de la galerie parallèle, ont été fermées. Malheureusement, cette dernière porte n'était pas étanche et il a fallu laisser couler l'eau chaude, dont le volume total atteignait 90 litres par seconde. Il en est résulté une élévation notable de la température sur les divers chantiers. C'est ainsi que, sur les chantiers de maçonnerie, la température s'est élevée à 32,5 degrés.

Du côté d'Iselle, on a pu avancer sans difficulté à partir de la zone aquifère du quatrième kilomètre jusqu'au point 9^k,110 de la galerie I ; mais, à ce dernier point, on a mis à jour, le 6 septembre

(*) Voir le profil page 54.

1904, une source ayant un débit d'environ 60 litres par seconde et une température de 45°, qui a obligé à suspendre les travaux d'avancement. Cette source correspond à une faille séparant les micaschistes granatifères gris, presque toujours plus ou moins calcaires, dans lesquels on avait marché depuis longtemps, du véritable calcaire semblable à celui dans lequel on se trouvait du côté Nord, au point 10^k,376 où les travaux avaient été arrêtés. La suspension des travaux, du côté Sud, a été nécessitée par l'impossibilité dans laquelle on se trouvait d'abaisser la température de l'air, la conduite de 0,253 de diamètre destinée à amener de l'eau froide n'étant posée que jusqu'au point 6^k,900. Les travaux ont pu être repris le 19 décembre 1904, d'abord à la main pendant la traversée de la faille, puis mécaniquement, et ils ont été poursuivis sous nouvel incident jusqu'au 24 février 1905, date de la rencontre des deux galeries.

Température de la roche. — Dans leur rapport du 19 juillet 1894, les experts chargés de donner leur avis sur le projet de percement du tunnel du Simplon avaient estimé que la température maxima de la roche ne dépasserait pas 40 degrés. Mais, en réalité, cette appréciation s'est trouvée fort au-dessous de la vérité, car la température de la roche, mesurée dans des conditions qui pouvaient donner un écart de 2 ou 3 degrés en moins, s'est élevée à 49 degrés, de sorte que la température réelle a dû dépasser 50 degrés.

Cette augmentation considérable de la température prévue résulte, en premier lieu, des nombreuses sources d'eau chaude circulant à l'intérieur de la roche et dont la température élevée provenait, soit d'un siphonnement à travers des couches inférieures au tunnel, soit d'actions chimiques. Peut-être aussi, l'évaluation des experts était-elle trop faible en elle-même, c'est-à-dire indépendamment de l'influence des sources chaudes qu'ils ne pouvaient pas soupçonner. Ils se sont basés, en effet, sur la température constatée au percement du Gothard et ont déterminé, d'après ces constatations, les profondeurs par lesquelles la température croît de un degré. Ainsi, au point correspondant au sommet du Gothard, qui est à la cote 2.850, la température dans le tunnel a

été de 30°,8. La hauteur superposée au tunnel étant de 1.700 mètres il en résulte, en supposant la température moyenne de la surface égale à 1 degré, un accroissement de 1° pour 57 mètres de hauteur, c'est-à-dire un degré géothermique de 57 mètres. Au Simplon, où l'altitude maxima de la montagne est la même qu'au Gothard, soit 2.850 mètres les experts ont admis, pour des raisons qui ne sont pas clairement exposées dans leur rapport que l'accroissement de 1 degré s'effectuerait pour 62 mètres de hauteur. Or, cette déduction n'est pas absolument légitime, parce que le tunnel du Simplon passe à une altitude inférieure de 450 mètres à celle du Gothard. En admettant même que, du sommet du Simplon au niveau du tunnel du Gothard (1.155 mètres), la température augmente de 1° pour 62 mètres, il est à présumer, d'après le peu que nous savons sur les lois générales de la variation de la température à l'intérieur de la croûte terrestre, qu'entre le niveau du Gothard (1155 mètres) et celui du Simplon (705 mètres), l'accroissement de la température est plus rapide qu'au-dessus. Il en résulterait que, du sommet du Simplon au niveau du tunnel, l'augmentation de 1° se produirait pour une hauteur inférieure à 62 mètres.

Sur le versant Sud, la présence de sources froides très abondantes a produit un effet contraire à celui dont nous venons de parler pour le versant Nord, et la température a été notablement au-dessous des prévisions. L'abaissement de la température normale a commencé environ 1.800 mètres avant la région aquifère et s'est fait sentir jusqu'à 1 kilomètre environ au delà.

Ventilation. — Quoique les évaluations relatives à la température de la roche fussent trop faibles, on s'attendait cependant à trouver une température bien supérieure à celle qui avait été constatée dans le percement du Mont-Cenis et du Gothard et qui n'était que d'une trentaine de degrés. Il était donc indispensable de prévoir une ventilation beaucoup plus énergique. Dans les grands tunnels exécutés antérieurement, la quantité d'air introduite avait été peu considérable. Au Mont-Cenis, on avait pensé que $\frac{1}{10}$ de mètre cube par seconde serait suffisant ; à la vérité, on avait dû

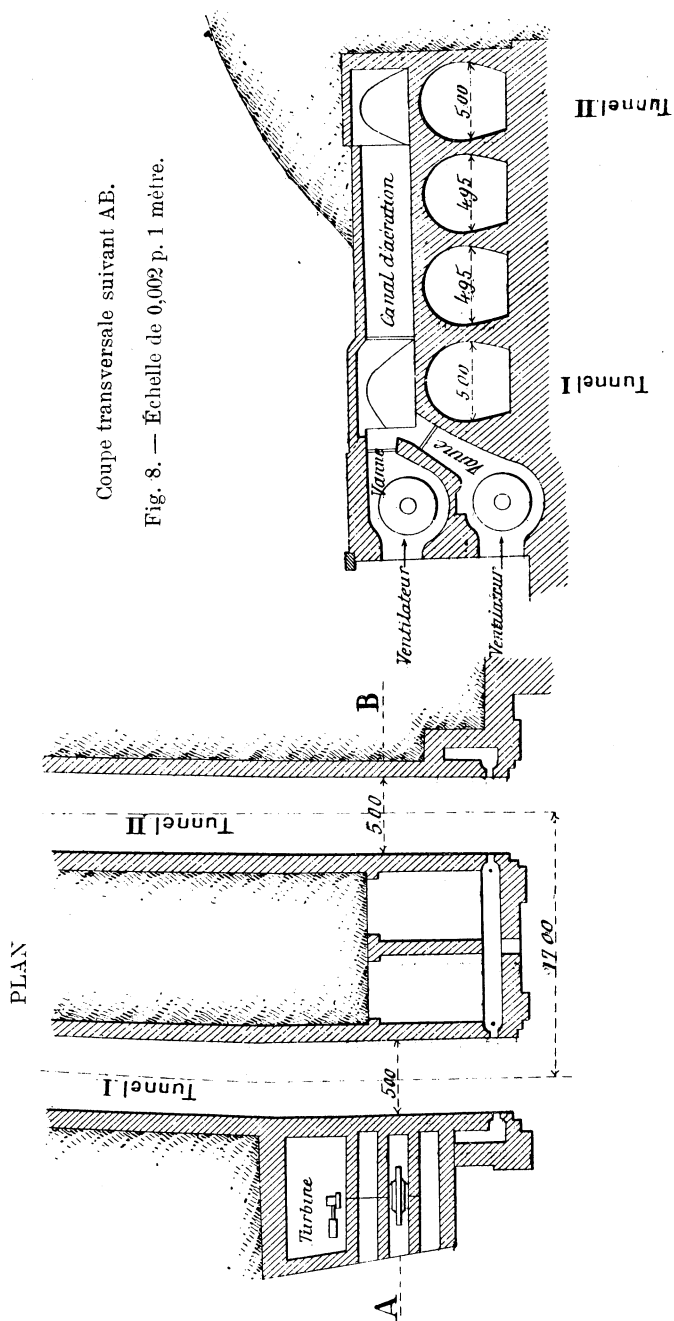
aller notablement au-delà ; mais, autant qu'on peut en juger d'après les renseignements assez incomplets que l'on possède sur l'exécution des travaux, on ne paraît pas avoir dépassé un demi-mètre cube par seconde. Au Gothard, on est allé jusqu'à 2 mètres cubes. Enfin, à l'Arlberg, on a atteint 6 mètres cubes, bien que la température de la roche ait été beaucoup plus faible qu'au Mont-Cenis et au Gothard, et n'ait pas dépassé 22 degrés. Comme on le voit, l'expérience avait démontré l'utilité d'une aération abondante même avec une température peu élevée. Dans le projet du Simplon, on avait admis que le volume d'air à introduire de chaque côté devait pouvoir atteindre 50 mètres cubes par seconde, et l'introduction d'un volume aussi élevé exigeait des dispositions spéciales.

Les dispositions adoptées ont consisté, comme nous l'avons déjà dit, dans l'exécution de deux galeries d'avancement parallèles, reliées tous les 200 mètres, par des galeries transversales (*). L'une des deux galeries, désignée par le chiffre I, est immédiatement agrandie suivant la section nécessaire pour un tunnel à une voie. L'autre galerie, désignée par le chiffre II, est conservée provisoirement avec une section réduite de 8 mètres carrés. C'est cette galerie qui sert de canal de ventilation. Sa section est suffisante pour permettre l'introduction d'un volume d'air de 50 mètres cubes par seconde, sans dépasser sensiblement la vitesse de 6 mètres, qui avait paru une limite convenable. Du reste, bien que la température se soit élevée notablement au-dessus des prévisions, il n'a pas été nécessaire d'envoyer 50 mètres cubes d'air par seconde ; le maximum a été de 35 mètres cubes. On a soin de fermer, au moyen de portes, toutes les transversales, sauf la dernière, de manière que l'air introduit suive toute la longueur de la galerie II, pénètre par la dernière transversale dans la galerie I et revienne à la tête du tunnel en suivant cette dernière galerie.

L'air est envoyé dans le tunnel au moyen de deux puissants ventilateurs installés à chaque tête. Les croquis ci-apres qui se

(*) L'idée de percer deux galeries est due, croyons-nous, à un ingénieur de Zurich, M. Hirzel, aujourd'hui décédé.

rapportent à la tête nord, permettent de comprendre la disposition adoptée.



Chaque ventilateur, de 3^m,75 de diamètre, peut fournir 25 mètres cubes d'air par seconde, sous une pression de 250 millimètres d'eau. Les deux ventilateurs peuvent, soit travailler en série et livrer 25 mètres cubes d'air par seconde sous une pression de 500 millimètres d'eau, soit travailler parallèlement, en quantité, et donner 50 mètres cubes d'air sous une pression de 250 millimètres d'eau. Ils peuvent, d'ailleurs, indifféremment, introduire dans la galerie l'air aspiré du dehors ou rejeter à l'extérieur l'air aspiré dans le tunnel.

L'entrée de chaque tunnel est fermée par un rideau en toile à voile qui peut être manœuvré par une petite turbine ou à la main. Ce rideau est sans aucun danger pour la circulation des trains.

Les transversales étant espacées de 200 mètres, la distance de la dernière transversale aux deux fronts d'attaque peut atteindre un peu plus de 200 mètres et il est nécessaire d'employer des moyens spéciaux pour faire parvenir une quantité suffisante d'air jusqu'à ces fronts d'attaque. Ces moyens constituent la ventilation secondaire. On emploie pour cela des injecteurs à eau, dont le croquis ci-dessous permet de comprendre la disposition, qui est extrêmement simple.

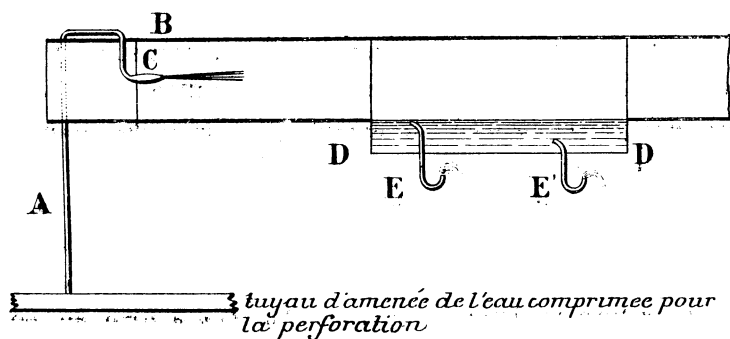


Fig. 9.

Du tuyau d'amenée de l'eau comprimée pour la perforation mécanique, part un petit tuyau A qui pénètre dans un grand tuyau B de 0,30 et même 0,40 de diamètre, et lance un jet d'eau comprimée

à 90 atmosphères environ par une tubulure C fixée au milieu du tuyau B. Cette tubulure porte deux ou trois petits trous de 3 millimètres de diamètre. Le jet d'eau ainsi lancé avec une grande vitesse entraîne un courant d'air dans le tuyau B. L'eau tombe dans un évasement D D' du tuyau et s'écoule au dehors par des siphons E E'. La dépense d'eau est de 2 litres environ par seconde. La portée d'un seul injecteur est d'environ 125 mètres. Quand le front d'attaque se trouve à une distance de la dernière transversale excédant cette limite, on emploie deux injecteurs. On a pu, au moyen de cet appareil, envoyer au front d'attaque jusqu'à 2^m3,70 d'air par seconde.

On a aussi fait usage, pour la ventilation secondaire, de petits ventilateurs centrifuges envoyant au front d'attaque une partie de l'air provenant de la ventilation principale. Mais ce procédé a été peu employé et l'on a surtout eu recours aux injecteurs décrits ci-dessus.

Réfrigération — L'air introduit joue un double rôle. Il sert à la respiration des ouvriers et à l'abaissement de la température. Lorsque la température est élevée, cette dernière fonction exige un volume d'air beaucoup plus considérable que la première. La réfrigération s'effectue peu, en réalité, par l'abaissement de la température de la roche, qui est relativement lent, mais surtout par le renouvellement rapide de l'air dans lequel travaillent les ouvriers, de manière que cet air n'ait pas le temps de s'échauffer beaucoup au contact de la roche chaude.

L'air introduit dans la galerie II s'échauffe au fur et à mesure qu'il pénètre dans le tunnel. Ainsi, pendant le deuxième trimestre de l'année 1902, cet air, qui à l'extérieur, du côté de Brigue, avait une température moyenne de 12°, s'échauffait à 20°5 au point 5^k.500 et à 24°7 au point 7^k.100. Pendant le premier trimestre de 1903, la température de l'air qui était de 3° seulement à l'entrée, s'élevait à 26°8 au point 6^k.650. On a dû, dès lors, adopter des dispositions pour le rafraîchir. Dans ce but, on a posé dans la galerie II une canalisation spéciale, en tuyaux de 0^m,253 de diamètre, destinée à amener de l'eau sous pression. La conduite est placée à

l'intérieur d'une enveloppe de tôle de 0^m,42 de diamètre contenant du charbon de bois pulvérisé, qui a pour but de s'opposer à l'échauffement de l'eau. Deux pompes centrifuges de 300 chevaux chacune, accouplées directement sur des turbines, peuvent envoyer dans la conduite 80 litres d'eau par seconde, à une pression de 22,5 atmosphères, si elles agissent séparément, et de 45 atmosphères, si elles fonctionnent ensemble. L'eau ainsi comprimée est amenée à un appareil de réfrigération par pulvérisation.

Cet appareil se compose de plusieurs groupes de tuyaux dont chaque groupe comprend six bras verticaux munis de 21 pommes d'arrosoir ayant chacune 3 à 4 ouvertures de 3 millimètres de diamètre. L'eau sort pulvérisée en forme d'éventail, à travers lequel passe l'air de la ventilation.

Pour dessécher l'air qui, après avoir traversé le pulvérisateur, est saturé d'humidité, on se sert de deux tamis en fil de fer au milieu desquels se trouve un panneau en forme de jalousie.

Cet appareil de réfrigération a fonctionné pour la première fois au mois de juin 1902 ; il était placé au point 6^k,890 et comprenait deux groupes de tuyaux. La température de l'eau, qui était de 9°,6 à l'entrée dans le tunnel, s'est élevée à 13°,6 à ce dernier point. La température de l'air de la ventilation, qui était de 25° avant de traverser le pulvérisateur, a été abaissée à 18°,5, d'où une diminution de 6°,5.

Quant à l'air de la ventilation secondaire, il est refroidi par le contact avec l'eau froide lancée par les injecteurs et exceptionnellement par l'emploi de la glace.

Avant l'emploi du pulvérisateur décrit ci-dessus, on avait employé des wagons glacières, qu'on faisait stationner dans une transversale par laquelle passait l'air de la ventilation. Mais la réfrigération obtenue par ce procédé n'est pas suffisante et l'emploi de ces wagons, qu'il aurait fallu renouveler toutes les deux heures, est peu commode ; aussi, on y a renoncé pour la ventilation principale et on ne les a employés qu'exceptionnellement pour la ventilation secondaire, lorsque la température était trop élevée.

Il est à peine besoin d'expliquer qu'on emploie plusieurs pulvérisateurs, placés aux points les plus convenables pour rafraîchir

l'air des différents chantiers. On a soin aussi de rafraîchir les parois de la roche en arrière des fronts d'attaque en les arrosant, au moyen de pommes d'arrosoir, par de l'eau fournie par la conduite d'eau comprimée destinée à mettre en marche les perforatrices.

L'emploi de ces différents moyens a été efficace; et, malgré la température élevée de la roche, qui a atteint et même dépassé 50°, les ouvriers ont pu travailler sans être sérieusement gênés et l'état sanitaire est resté toujours satisfaisant.

L'eau comprimée qui actionne les perforatrices servant aussi, comme nous l'avons expliqué, à la réfrigération; au voisinage du front d'attaque; il importe d'empêcher le plus possible qu'elle s'échauffe. On a soin, dans ce but, d'isoler la conduite dans une enveloppe en bois et l'on garnit de balle de riz le vide laissé entre l'enveloppe et la conduite.

Force motrice. — L'exécution des grands tunnels exige l'emploi d'une force motrice considérable, et l'organisation de cette force motrice est la première question dont on doit se préoccuper dans la préparation des projets. Au Simplon, on s'est heureusement trouvé, à cet égard, dans des conditions favorables.

Du côté Nord (Brigue), la force motrice est empruntée au Rhône, au moyen d'un canal de dérivation de 3.200 mètres de longueur, suivi d'une conduite en pression de 1.500 mètres. Le canal a son origine au village de Moerel, sur la rive droite du Rhône; il est construit en béton armé, système Hennebique, et présente une section de $1^m,90 \times 1^m,90$. Le canal est en souterrain au Massaboden sur 223 mètres de longueur. La partie exécutée en béton armé repose sur des piles en maçonnerie ou sur des palées en béton armé, lorsque la hauteur dépasse 3 mètres; ces supports sont espacés de 5 mètres d'axe en axe. La prise d'eau comprend un barrage sur le bras du Rhône et un bassin en maçonnerie.

La conduite en pression est en tuyaux de tôle rivée, de $1^m,60$ de diamètre, dont l'épaisseur est successivement de 6, 8 et 9 millimètres. Afin de parer aux effets de la dilatation, la conduite est ancrée sur sept piliers en maçonnerie; en outre, elle est recouverte de déblais sur la plus grande partie de sa longueur.

Le canal peut débiter 5 mètres cubes par seconde et la conduite à une chute utile de 44^m,50, donnant une force disponible de 2.250 chevaux sur l'axe des turbines.

Sur le versant italien, la force motrice est fournie par le cours d'eau la Diveria, au moyen d'une conduite en pression de 4.210 mètres de longueur, en tuyaux de fonte sur 1.160 mètres et de tôle sur 3.050; le diamètre des tuyaux est de 0^m,90. La conduite est en galerie sur 290 mètres. La prise s'effectue au moyen d'un barrage et d'un bassin en maçonnerie. Le débit prélevé sur la rivière est de 1 mètre cube en basses eaux et de 1^m³,4 en eaux moyennes. La chute utile est de 158 mètres, ce qui fournit une force motrice disponible aux turbines variant de 1.600 à 2.200 chevaux. Un autre cours d'eau, la Cairasca, peut, en cas de besoin, fournir une force motrice supplémentaire; mais on a pu se dispenser d'y recourir.

L'eau amenée par les conduites en pression actionne des turbines qui fournissent la force motrice nécessaire aux différents services de l'entreprise. Le tableau suivant, dressé d'après les indications qu'a bien voulu nous donner M. Colomb, directeur du 1^{er} approfondissement des chemins de fer fédéraux, à Lausanne, indique, en chevaux-vapeur, la répartition de cette force motrice.

Désignation des Services	Côté Nord (Brigue)			Côté Sud (Iselle)		
	Nombre des turbines	Force en chevaux	Force totale	Nombre des turbines	Force en chevaux	Force totale
Compression d'eau pour les perforatrices et d'air pour les locomotives à air comprimé	4	250 et 600	1.700	4	250 et 600	1.700
Ventilation	2	200	400	2	200	400
Refoulement d'eau froide pour la réfrigération	2	300	600			
Production de l'électricité	2	400 et 200	300	4	400	400
Ateliers	2	45	90	6		140
Divers	4	6	6	4	8	8
Totaux			3 096			2.348

Sept perforatrices sont généralement en service de chaque côté, savoir trois à l'avancement de chaque galerie et une aux galeries transversales; elles absorbent une force de 30 chevaux par ma-

chine, soit 210 pour l'ensemble. On peut compter aussi 210 chevaux pour la ventilation secondaire et pour la mise en marche d'éjecteurs destinés à des épuisements d'eau à l'intérieur du tunnel.

La force totale des turbines est plus considérable que la force motrice disponible, parce qu'on a tenu à avoir des machines en réserve. Il y a, en général, un nombre de turbines double de celui qui est nécessaire.

On dispose, en outre, de machines à vapeur, qui ont servi avant que la force hydraulique ne fût disponible. Ces machines, dont la puissance totale est de 220 chevaux de chaque côté, servent de réserve en cas d'accident.

Perforation mécanique. — L'emploi d'engins mécaniques pour percer des trous de mine remonte aux travaux du tunnel du Mont-Cenis, commencés au mois d'août 1857. Les perforatrices employées à ces travaux, et dont l'invention est due à l'Ingénieur Sommeiller, étaient actionnées par l'air comprimé. La force motrice, fournie par des chutes d'eau, servait à comprimer de l'air, et cet air, transporté au moyen d'une conduite jusqu'au front d'attaque, mettait en mouvement des fleurets analogues aux barres à mine des mineurs et agissant par percussion comme celles-ci. Après avoir exercé son action mécanique, l'air comprimé servait à aérer le front d'attaque et en outre à diminuer la température par l'absorption de chaleur résultant de la détente. Toutefois, les résultats obtenus à ce double point de vue étaient insuffisants.

La perforatrice primitive du Mont-Cenis a été l'objet de nombreux perfectionnements de détail et il existe maintenant un certain nombre de types différents, dont les plus connus, et en même temps les plus pratiques, sont la perforatrice Ferroux et la perforatrice Mac-Kean-Segin.

Les perforatrices à air comprimé présentent toutes des inconvénients assez sérieux qui tiennent au principe même de ces machines. La compression de l'air est accompagnée d'une élévation de température qui consomme du travail en pure perte. Les chocs résultant du mode d'action du fleuret entraînent une détérioration assez rapide des machines. Il se produit une poussière abondante

qui contribue à cette usure rapide et exerce en outre une influence fâcheuse sur la santé des ouvriers. Ce sont ces divers inconvénients qui ont amené M. Brandt à étudier la construction d'une perforatrice basée sur des principes tout à fait différents et, après de patientes recherches, cet ingénieux mécanicien a réussi à créer un engin qui paraît avoir une supériorité marquée sur tous les autres systèmes. Cette perforatrice ayant été déjà décrite dans différentes revues techniques, nous nous contenterons d'en rappeler les dispositions principales.

La perforatrice Brandt diffère de la perforatrice Sommeiller par deux caractères essentiels. C'est l'eau comprimée qui est employée, au lieu de l'air, pour transmettre la force motrice, et le foret, au lieu d'agir par pression, agit par rotation sous l'action d'une forte pression, à la manière d'une vrille ou mieux de la mèche d'un vilebrequin.

Le foret est formé d'un tube creux en acier très dur, de 0^m,07 de diamètre extérieur, dont l'extrémité est munie de dents tranchantes. Ces dents sont au nombre de trois ayant une forme analogue à celle des dents d'une scie.

Le foret reçoit un mouvement de rotation, et son extrémité est en même temps fortement pressée contre la roche, celle-ci se trouve par suite écrasée et pulvérisée. On peut faire passer à l'intérieur du foret l'eau qui a agi sur le moteur. Cette eau entraîne hors du trou de mine les éclats et les débris de la roche, de sorte qu'il ne se produit pas de poussière; de plus, elle refroidit le foret qui autrement s'échaufferait fortement.

On comprend sans peine qu'une pression considérable est nécessaire pour forcer les dents à pénétrer dans la roche et à la broyer. Au Simplon, la pression est d'environ 80 atmosphères au front d'attaque. Cette pression dépend d'ailleurs de la dureté de la roche à attaquer; mais, dans tous les cas, elle est toujours beaucoup plus considérable que dans les perforatrices à air comprimé, pour lesquelles elle ne dépasse pas 5 atmosphères au front d'attaque.

Nous donnons ci-après un croquis schématique, qui permettra de comprendre le fonctionnement de cette ingénieuse machine.

Le mécanisme de la perforatrice doit remplir un double but : presser fortement l'extrémité du foret contre la roche et lui imprimer un mouvement de

rotation.

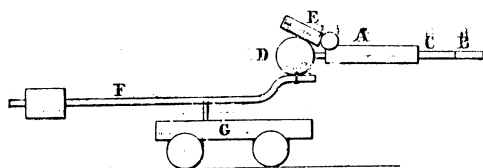


Fig. 10.

- A. — Cylindre mobile.
- B. — Foret.
- C. — Porte-outil.
- D. — Affût.
- E. — Machine à colonne d'eau à deux cylindres.
- F. — Balancier.
- G. — Chariot.

La pression s'obtient au moyen d'un cylindre mobile A portant le foret B par l'intermédiaire du porte-outil C. Le cylindre mobile se déplace sur un piston différentiel, solidement fixé sur un affût D. Un robinet à

trois eaux permet de faire agir l'eau comprimée sur l'un ou l'autre des côtés du piston et par conséquent de faire avancer ou reculer le cylindre mobile. Il est à peine besoin de dire que le mouvement en avant se produit quand l'eau agit sur la grande section du piston.

Le mouvement de rotation est produit par un moteur à colonne d'eau E, à deux cylindres, fixé sur la machine. Les bielles du moteur sont calées à 180 degrés; elles actionnent une vis sans fin qui commande une roue à escargot adaptée à l'enveloppe du cylindre mobile et lui transmet le mouvement de rotation. Cette enveloppe est reliée au cylindre mobile par un clavetage longitudinal, qui fait que les deux pièces participent au même mouvement de rotation, tout en pouvant glisser longitudinalement l'une par rapport à l'autre.

Par suite du double mouvement qui lui est ainsi communiqué, le foret s'enfonce dans la roche jusqu'à ce que l'appareil soit à fond de course, c'est-à-dire après un enfoncement de 0^m,60. On arrête alors le moteur et l'on ramène l'outil en arrière en tournant simplement un robinet qui fait agir l'eau sur la petite section du piston différentiel. On ajoute une rallonge au porte-outil et on continue un nouvel enfoncement de 0^m,60.

La vitesse de rotation, qui varie suivant la dureté de la roche et qui est de 5 à 6 tours par minute, se règle au moyen d'un robinet servant à l'introduction de l'eau dans le moteur.

On peut donner à un fond de mine près de 2 mètres de profondeur. Toutefois, en général, on s'arrête à 1^m,25 ou 1^m,50 environ. C'est la profondeur que l'expérience a fait reconnaître comme la plus avantageuse. Il paraît y avoir intérêt à réduire la profondeur lorsque la dureté de la roche est très grande.

Nous avons dit que la perforatrice est portée par un affût D. Cet affût se compose d'un cylindre creux, en fer forgé, de 0,24 de diamètre extérieur, muni d'un piston plongeur qui sert à l'appuyer solidement contre les parois de la galerie, et dont la course est de 0^m,30. L'eau comprimée est amenée dans le cylindre par un petit tuyau de cuivre, muni d'un robinet à trois eaux, qui permet de faire agir l'eau, soit sur la section entière du piston, quand il s'agit d'appuyer l'affût contre les parois de la galerie, soit sur une section annulaire quand on veut faire rentrer le piston-plongeur pour dégager l'affût. Ce dispositif fort simple permet d'appuyer l'affût contre les parois rocheuses avec une force suffisante pour qu'il ne puisse pas être déplacé malgré la pression considérable qu'il a à supporter, lorsque les trois perforatrices travaillent en même temps, comme c'est le cas ordinaire.

La perforatrice est munie d'un collier qui lui permet de tourner sur l'affût et de former avec la verticale un angle variable, qui peut être plus grand ou plus petit que 90°. Par suite de cette disposition, on peut forer des trous dans la direction que l'on juge la plus convenable pour obtenir le meilleur effet utile.

Enfin, l'affût est fixé par un collier sur un balancier F porté par un chariot G et qui peut se mouvoir dans tous les sens au moyen d'un manchon universel. Le chariot se meut sur la voie servant au transport des déblais.

Lorsque la perforation est terminée, l'affût est placé parallèlement à la voie, de manière à occuper, avec les trois perforatrices qu'il porte, le moins de place possible.

On ramène alors en arrière du front d'attaque le chariot portant l'affût et les perforatrices, et on le gare sur une voie en cul-de-sac.

L'eau comprimée est amenée à proximité du front d'attaque au moyen d'une conduite fixe, à laquelle on avait d'abord donné un diamètre intérieur de 0^m,10, mais on a dû plus tard porter ce dia-

mètre à 0^m,12. Au voisinage du front d'attaque, le diamètre est réduit à 0,05, puis à 0,02 ; la longueur de chacune de ces parties à plus faible diamètre est d'une centaine de mètres. De l'extrémité de la conduite fixe, l'eau est amenée aux perforatrices et à l'affût au moyen d'une conduite spéciale, formée de raccords articulés et qui peut prendre une orientation quelconque, et d'un appareil appelé distributeur. Ce dernier appareil est formé d'un tuyau muni de tubulures de prise d'eau avec leur robinetterie et d'un crible destiné à retenir les corps étrangers contenus dans l'eau. L'une des tubulures communique avec l'affût et les autres avec les diverses machines à mettre en marche. Le distributeur est boulonné sur le balancier qui porte l'affût.

Il est essentiel que l'eau soit parfaitement débarrassée de tout corps étranger et surtout de grains de sable, qui détérioreraient rapidement les perforatrices et les mettraient hors d'usage. Aussi, l'eau est filtrée avec soin, avant d'être comprimée, et elle passe en outre à travers un nouveau filtre avant de pénétrer dans les perforatrices.

La consommation d'eau est d'environ 2 litres par seconde et par perforatrice en marche. A cette consommation, il faut ajouter celle de l'eau employée pour rafraîchir les parois rocheuses au front d'attaque et pour la ventilation secondaire.

La pression nécessaire pour une bonne marche dépend de la dureté de la roche. On peut compter, avec une roche tendre, sur une pression de 30 à 40 atmosphères ; avec une roche de dureté moyenne, 50 à 60 atmosphères, et 80 à 90 avec les roches très dures.

La compression de l'eau s'effectue au moyen de pompes à plongeurs ou pistons différentiels, dont la construction et le fonction-

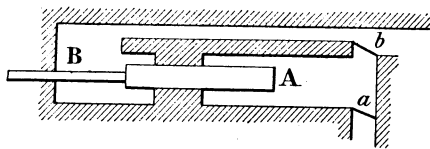


Fig. 41.

nement sont très simples.

Le principe de ces pompes est le suivant. La section du piston A est double de celle de la tige B, et le corps de pompe est muni

de deux soupapes, l'une d'aspiration *a*, l'autre de refoulement *b*. Lorsque le piston marche de gauche à droite sur le croquis ci-des-

sus, la soupape *a* est fermée et la soupape *b* soulevée. La diminution de volume de la capacité A étant double de celle de la capacité B, la moitié de l'eau refoulée se rend en B et l'autre moitié est refoulée dans la conduite de l'eau comprimée ou dans les accumulateurs. Dans le mouvement inverse, de droite à gauche, la soupape *a* est soulevée et la soupape *b* fermée; l'eau aspirée vient remplir la capacité A et l'eau refoulée en B, du côté de la section annulaire du piston, se rend dans la conduite ou dans les accumulateurs.

Ces soupapes sont construites de manière à pouvoir travailler à une pression de 100 atmosphères; mais elles sont essayées à une pression beaucoup plus considérable. Quand on pénètre dans la chambre des pompes de compression, on est surpris du peu de bruit qui s'y produit. La marche de ces engins est, en effet, remarquablement douce et silencieuse. Leur entretien est très simple et elles peuvent fonctionner très longtemps sans réparation.

Les pompes sont accouplées deux à deux de manière à régulariser le débit et la pression. Le grand modèle a un débit de 15 litres par seconde avec une vitesse de 70 tours par minute; il correspond à la consommation de sept perforatrices. Pour trois perforatrices, on peut employer un modèle plus petit, d'un débit de 6 litres par seconde.

Chaque paire de pompes est reliée à un accumulateur à poids, composé d'un cylindre avec son piston et muni d'une soupape de sûreté qui donne libre passage à l'eau superflue et s'ouvre quand l'accumulateur est à bout de course. La conduite de raccordement entre les pompes et l'accumulateur est pourvue d'une soupape de retenue, d'un trop-plein et d'un manomètre. La fonction de l'accumulateur est de régulariser la pression et d'emmagasiner les petits excédents d'eau.

Les tuyaux qui amènent l'eau en pression au front d'attaque se font en fer étiré ou en acier. Ces derniers sont plus coûteux, mais plus résistants; ils sont essayés à une pression de 250 atmosphères. Ces tuyaux sont fournis par des usines allemandes.

La perforatrice Brandt et les pompes de compression sont fabri-

quées par la maison de construction bien connue Sulzer frères, de Winterthur, Suisse.

La perforatrice à eau comprimée ne présente pas les inconvénients que nous avons signalés pour la perforatrice à air. M. Revaux, Ingénieur civil des Mines, auteur d'un mémoire sur les travaux du tunnel de l'Arlberg, inséré dans les *Annales des Mines*, livraison de septembre-octobre 1884, évalue la force nécessaire pour le service de la perforation à 120 chevaux avec la perforatrice Ferroux et à 90 chevaux seulement avec la perforatrice Brandt. Ce dernier chiffre, correspondant à 30 chevaux par perforatrice, est celui que nous avons indiqué dans les renseignements donnés plus haut au sujet de la répartition de la force motrice entre les différents services. M. Revaux estime aussi que la perforatrice hydraulique entraîne une consommation de dynamite notablement plus faible que la perforatrice à air comprimé; cette consommation serait, d'après lui, de 10 à 14 kilogrammes par mètre courant de la galerie d'avancement avec la première perforatrice et de 16 à 22 avec la seconde. Il attribue ce résultat au plus grand diamètre des trous de mine, qui est de 8 centimètres dans le premier cas, et de 3 seulement dans le second, et à la meilleure utilisation de la charge qui résulte de cette augmentation. Toutefois, la conclusion à laquelle est arrivé M. Revaux nous paraît contredite par les résultats du percement du Simplon, pour lequel la consommation moyenne de dynamite a été de 24 kilogrammes du côté Nord et de 28^k,5 du côté Sud par mètre d'avancement. Nous croyons que l'augmentation du trou de mine cesse d'être avantageuse lorsque la surface du front d'attaque est petite, comme c'est le cas pour la galerie d'avancement, et lorsqu'il est nécessaire, comme c'est aussi le cas, d'obtenir des matériaux d'un faible volume, faciles à manier, ce qui oblige à augmenter la charge d'explosif. Cette considération expliquerait la grande consommation de dynamite constatée au Simplon pour l'exécution de la galerie d'avancement et qui doit être supérieure à ce qu'elle aurait été avec la perforatrice à air comprimé.

La perforatrice hydraulique nous paraît aussi plus coûteuse au point de vue de la consommation des burins, et cela pour deux

raisons. La première, c'est que, dans cette perforatrice, le burin tourne lentement et n'a qu'une faible force vive, tandis que, dans la perforatrice à air comprimé, le fleuret est animé d'une grande vitesse qui diminue l'usure. La seconde, c'est que le burin de la première perforatrice coûte beaucoup plus, à égalité de poids, que le fleuret de la seconde.

Il est fort difficile de donner des chiffres précis pour la comparaison des deux systèmes de perforatrice. Il faudrait, pour cela, les employer dans des conditions tout à fait semblables, ce qui n'a jamais eu lieu. Nous croyons cependant que les avantages spéciaux de la perforatrice Brandt lui assurent une supériorité marquée. Elle supprime complètement la poussière, ce qui est un avantage important pour la santé des ouvriers et pour l'entretien des machines. Elle circule sur la voie qui sert au transport des déblais, tandis que la perforatrice à air comprimé exige une voie spéciale plus large ; la perforatrice Brandt est ainsi d'une installation plus simple et elle est beaucoup moins encombrante. Cette dernière n'exige que peu de réparations, tandis que la perforatrice à air comprimé, rapidement détériorée par les chocs et par la poussière, doit retourner à l'atelier tous les quatre jours environ. L'eau comprimée, qui fait fonctionner la perforatrice hydraulique, sert aussi à rafraîchir les parois de la roche au front d'attaque et à absorber une partie des gaz provenant de l'explosion. Enfin, nous croyons que le rapport du nombre de trous percés sur le front d'attaque au nombre des burins fonctionnant simultanément est plus considérable avec l'air comprimé qu'avec l'eau comprimée. Dans le gneis d'Antigorio, le nombre de trous était en moyenne de 12 ; le nombre des burins étant de 3, le rapport est égal à 4. Avec des perforatrices à air comprimé, il aurait certainement fallu au moins 30 trous, ce qui, avec six perforateurs, aurait donné un rapport égal à 5. Pour toutes ces raisons, il nous semble que la perforatrice Brandt entraîne moins de pertes de temps et doit donner, à conditions égales, un avancement plus rapide.

La galerie d'avancement a d'ordinaire une largeur de 3 mètres, et une hauteur de 2 mètres, soit une superficie de 6 mètres carrés. Cette largeur de 3 mètres permet de faire travailler trois perfora-

trices à la fois. Le travail s'exécute par relais de 8 heures et, bien entendu, sans autres interruptions que celles qui sont nécessitées par la vérification de l'alignement du tunnel, par des fêtes spéciales telles que la Sainte-Barbe, ou par des circonstances imprévues. Deux hommes suffisent pour la conduite d'une perforatrice ; mais on ajoute un chef de poste, ce qui fait sept personnes pour la perforation proprement dite. Il y a, en outre, neuf personnes pour l'enlèvement des déblais, ce qui fait, en tout, 16 personnes, quelquefois même 17, pour un poste complet de perforation mécanique.

Système d'attaque. — On sait qu'il existe deux systèmes différents d'attaque pour l'exécution des tunnels, suivant que la galerie d'avancement est placée en haut ou en bas de la section. Dans les tunnels ordinaires, où le percement des trous de mines s'effectue à la main, la question des transports n'a qu'une importance secondaire, car l'avancement est très lent et le cube des matériaux à transporter chaque jour peu considérable. Dans ces conditions, le système d'attaque se détermine d'après la résistance de la roche. S'il s'agit d'une roche ne tendant pas à se déformer, on admet d'ordinaire qu'il est avantageux de placer la galerie d'avancement à la partie supérieure ; on peut ainsi exécuter rapidement la voûte et obtenir un plafond solide, sous lequel on est à l'aise pour l'achèvement des travaux. Si, au contraire, le rocher tend à se déformer, il est préférable de placer la galerie d'avancement à la base. Mais, avec la perforation mécanique, qui augmente beaucoup le cube des matériaux à transporter journellement, la question de la facilité des transports a une importance capitale. Or, il est clair qu'avec une galerie de faite, on est très gêné pour effectuer des transports importants, et dès lors ce système n'a plus de raison d'être, quelle que soit la nature de la roche. Au tunnel du Gothard, l'entrepreneur, M. Louis Favre, avait voulu adopter l'attaque par galerie de faite, malgré l'avis contraire d'Ingénieurs expérimentés, et l'expérience a amplement démontré les graves inconvénients de cette méthode. Les transports ont été excessivement difficiles par suite de la nécessité de placer les voies à des

niveaux différents et de les relier par des rampes de raccordement qu'il fallait déplacer constamment. On essaya d'employer des monte-charges mobiles pour faire passer les wagons directement d'un étage à l'autre ; mais, après plusieurs mois d'essais, on dut renoncer à ces appareils encombrants et d'une manœuvre difficile. En outre, l'écoulement des eaux s'effectuait dans de mauvaises conditions et fréquemment les ouvriers durent travailler dans l'eau. Enfin, ce système d'attaque, que l'entrepreneur supposait avantageux pour l'aération des chantiers, ne répondit nullement à ses prévisions. L'expérience du Gothard est donc décisive et prouve que l'attaque par la partie supérieure doit être absolument rejetée pour les longs tunnels. Au contraire, le système d'attaque par la base, qui avait été employé pour le Mont-Cenis et l'Arlberg, donne toute satisfaction.

Du reste, avec le système d'une double galerie, adopté pour le Simplon, la question du choix à faire entre les deux modes d'attaque ne se pose même pas. Il est évident, en effet, que, si l'on plaçait les galeries d'avancement au sommet de la section, la galerie parallèle servirait simplement comme tuyau d'aération, et qu'on ne pourrait l'utiliser pour faciliter les transports et l'écoulement des eaux. Aucune hésitation n'était donc possible, et c'est le système d'attaque par la base qui a été adopté. Il n'est pas inutile d'ajouter, d'ailleurs, qu'avec la perforatrice Brandt, qui creuse des trous de 8 centimètres de diamètre, dans lesquels on introduit des charges de 20 à 30 kilogrammes de dynamite, il est avantageux d'attaquer les travaux par la base afin d'éviter de disloquer, par de violentes explosions, la partie supérieure du tunnel.

Chargement des déblais au front d'attaque. — Les Ingénieurs suisses désignent le chargement des déblais au front d'attaque sous le nom de *marinage*, expression qui a l'avantage de simplifier le langage et dont nous ferons usage.

La Société d'entreprise Brandt et Brandau avait fondé de grandes espérances sur l'emploi de l'eau comprimée pour faciliter le chargement des déblais. Après l'explosion, la masse des matériaux couvre une longueur de 7 à 8 mètres seulement au devant du

front d'attaque. Si l'on pouvait projeter cette masse sur une longueur beaucoup plus grande, il serait possible de débayer rapidement la voie de service, ainsi que l'emplacement nécessaire pour les perforatrices, et l'on pourrait reprendre la perforation mécanique dans un délai beaucoup plus court que dans les conditions ordinaires. Les déblais laissés de chaque côté de la voie, en arrière des perforatrices, seraient chargés pendant le forage. Des essais, entrepris avant le commencement des travaux du Simplon, avaient montré que cette dispersion des déblais sur une grande étendue pouvait être obtenue au moyen de l'eau comprimée, et ce système, auquel on a donné le nom de *marinage hydraulique*, a été appliqué du côté d'Iselle pendant le mois d'août 1900. Voici, d'après les explications fournies par les rapports officiels des travaux, comment on procédait. On applique contre le front d'attaque une caisse rectangulaire, appelée *loup*, ayant 0^m,90 de longueur, 0^m,20 de largeur et 0,12 de hauteur, et portant sur sa paroi arrière 7 orifices, disposés suivant une ligne horizontale. Les deux orifices extrêmes et celui du milieu sont ovales; les quatre autres sont circulaires. Au moment du départ des coups de mine, on lâche l'eau comprimée à travers les orifices de la caisse, et l'on obtient ainsi un jet d'eau multiple, lancé avec une grande vitesse, qui projette une partie des déblais à une distance notable du front d'attaque. La consommation d'eau étant de 50 litres par seconde, on est obligé d'employer toute l'eau amenée au front d'attaque et d'interrompre momentanément la ventilation secondaire. Il y a là une difficulté pratique, qui a fait renoncer à poursuivre les essais.

Pendant ce même mois d'août 1900, on a essayé, du côté de Brigue, un système de marinage consistant dans l'emploi de bennes à bascule d'une capacité de $\frac{1}{10}$ de mètre cube, roulant sur une voie de 0^m,30, posée sur un plancher recouvrant les wagons destinés à recevoir les déblais. Ce procédé n'a pas donné de bons résultats et on l'a abandonné.

Antérieurement, on avait employé des wagonnets de 0^m,30 de capacité, roulant sur une voie de 0^m,50 d'écartement, que l'on amenait, une fois chargés, sur des wagons plats circulant sur la voie

de 0^m,80 servant au transport des déblais. Chaque wagon plat recevait cinq wagonnets. Ce système a été aussi abandonné.

En définitive, le système reconnu comme le plus pratique consiste à pousser la voie de 0^m,80 jusqu'au front d'attaque et à charger directement les déblais dans les grands wagons destinés au transport, qui ont une contenance de 1^m³,50.

Les wagons vides sont remisés dans la transversale la plus rapprochée et on les amène deux par deux près du front d'attaque, où sont installés deux chariots transbordeurs, qui permettent de remplacer immédiatement les wagons chargés par des wagons vides. Toutefois, ces chariots transbordeurs ne sont pas d'une installation et d'un fonctionnement commodes, et on les a remplacés par une petite voie de garage.

Le nombre des hommes employés au front d'attaque est, comme nous l'avons expliqué, de 16 ou même 17. Tout ce personnel travaille au marinage. Les hommes placés le plus en arrière chargent directement les matériaux dans les wagons ; les autres sont occupés à remplir des paniers. Il faut environ 2 heures et demie pour charger le volume de déblais correspondant à 1 mètre d'avancement, et qui est en moyenne de six mètres cubes.

Transport des déblais hors du tunnel. — La voie servant au transport des matériaux a 0^m,80 d'écartement et les wagons ont une capacité de 1^m³,50. Les rails sont du poids de 22 kilogrammes.

A l'origine, on comptait utiliser la galerie II pour l'entrée des trains et la galerie I pour la sortie, de sorte que les trains auraient marché dans le même sens que la ventilation. Mais on a renoncé à cette disposition qui, avec des locomotives à feu, présente l'inconvénient grave d'introduire dans le tunnel les produits de la combustion.

Les trains entrent et sortent par la galerie I et suivent la voie posée dans cette galerie jusqu'à une station établie vers la fin de la partie complètement terminée. De cette station, les trains conduisant les wagons vides à l'avancement sont refoulés, par une transversale, dans la galerie II, qu'ils suivent jusqu'à la dernière transversale exécutée. Les wagons vides sont garés dans cette

dernière transversale. Les wagons chargés suivent la route inverse. Par suite de cette disposition, les wagons vides destinés aux fronts d'attaque et les wagons chargés en provenant ne traversent pas les chantiers d'élargissement et ceux de maçonnerie, ce qui est un avantage.

La traction jusqu'à la station s'effectue au moyen de locomotives à vapeur, pourvues de chaudières assez grandes pour que la course, à la montée, puisse s'effectuer sans recharger le feu. Malgré cette disposition, l'emploi de locomotives à vapeur offre des inconvénients par suite de la chaleur et de la fumée qu'elles dégagent.

Au delà de la station, les transports se sont effectués pendant assez longtemps au moyen de chevaux et ensuite à bras au voisinage des fronts d'attaque. Les chevaux ont été remplacés par de petites locomotives à air comprimé, dont les données principales sont les suivantes.

Diamètre du piston	0 ^m , 125
Course	0 , 150
Diamètre des roues	0 , 620
Nombre des essieux	2
Écartement des essieux	1 ^m , 200
Multiplication	1 : 3 ^m , 25
Pression au travail	15 atmosphères.
Pression moyenne dans le réservoir .	70 »
Pression maxima	100 »
Capacité du réservoir	2.000 litres.
Poids de la locomotive	6.590 kil.
Largeur maxima	1 ^m , 992
Hauteur	1 , 650
Longueur	4 , 770

Ces locomotives peuvent parcourir 4 kilomètres sans être rechargées. Il y en a toujours deux en service, de manière que l'une puisse être rechargée pendant que l'autre travaille.

La détente de l'air comprimé produisant un abaissement de température considérable, on est obligé, pour éviter la transformation en glace de la vapeur d'eau contenue dans cet air, de le faire passer à travers un réservoir contenant de l'eau chaude et de la vapeur. Pour réchauffer ce mélange, on emploie une chaudière à vapeur séparée; mais ce procédé n'est pas d'une application commode.

L'emploi de locomotives à air comprimé n'a pas supprimé complètement l'emploi des chevaux du côté Sud; on a continué à se servir de chevaux dans le voisinage du front d'attaque.

Sur le côté Nord, le nombre ordinaire des trains était de 24 par jour, dont 18 trains de matériaux et 6 pour le transport des ouvriers. Sur le côté Sud, où l'avancement était un peu moins rapide, le nombre des trains était de 20.

Écoulement des eaux. — L'écoulement des eaux s'effectue au moyen d'un canal maçonné ou bétonné creusé dans la galerie II, qui reçoit non seulement les eaux de cette galerie, mais aussi celles de la galerie I, qui y sont déversées par les transversales. De cette manière, les chantiers d'élargissement et d'abatage et les chantiers de maçonnerie se trouvent bien asséchés et le travail s'effectue dans des conditions commodes.

Bien que les eaux rencontrées du côté Nord aient été beaucoup moins abondantes que du côté Sud, elles ont néanmoins causé de très grandes difficultés dans l'exécution des travaux. Ces difficultés provenaient de deux circonstances. En premier lieu, certaines sources avaient une température d'environ 50 degrés et produisaient sur les chantiers d'avancement une température qui rendait le travail très difficile. En second lieu, l'avancement du côté Nord, marchant beaucoup plus rapidement que du côté Sud, avait dépassé le point où se produit le changement de pente pour descendre vers le versant italien. Pour faciliter l'écoulement des eaux, on avait, ainsi que nous l'avons déjà expliqué, continué la perforation avec une rampe de 0,0015, à partir du point culminant du profil, situé à 9^k,573 de la tête Nord. Mais, à partir du point 9^k,979, soit 406 mètres plus loin, on avait dû redescendre, avec une pente de 0,025 afin de rejoindre le seuil correspondant à la pente de 0,007 allant vers l'Italie, de manière à ne pas faire du travail inutile. C'est dans ce dernier parcours qu'on a rencontré des sources chaudes d'un grand débit, et notamment une source donnant 50 litres par seconde, au point 10^k,144, qui a forcé d'interrompre les travaux du 21 novembre 1903 au 20 mars 1904. A cette dernière date, on a repris la perforation mécanique en remontant,

avec une rampe de 1 millimètre, bien qu'on fût encore à 0^m,49 au-dessus du seuil. Le profil suivi pour la perforation est celui qui est indiqué ci-dessous :

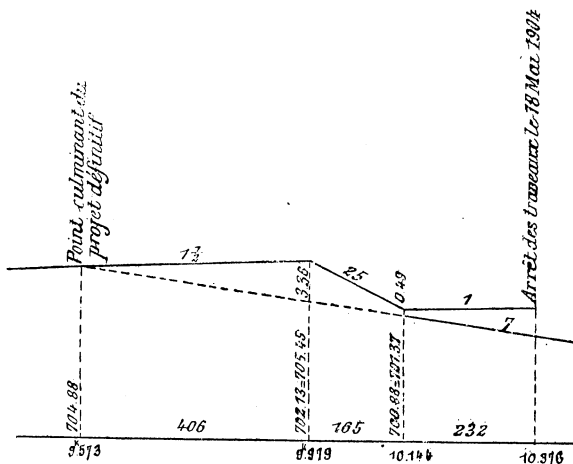


Fig. 12.

La partie en contrepente, entre les points 9^k,979 et 10^k,144, a été complètement inondée. Après l'épuisement des eaux, on a installé six turbines avec pompes centrifuges, afin de pouvoir maintenir cette partie à sec. Les turbines sont mues par l'eau comprimée de la conduite servant à la perforation. On a de plus installé deux portes de sûreté, l'une dans la galerie II au point 10^k,112, l'autre dans la galerie I, au point 10^k,129. Deux des six pompes centrifuges sont constamment en service ; les quatre autres sont en réserve. Ainsi que nous l'avons déjà dit, la rencontre d'une nouvelle source chaude a obligé à interrompre d'une manière définitive la perforation sur le côté Nord, le 18 mai 1904, et, la porte établie au point 10^k,112 de la galerie II n'étant pas étanche, les eaux chaudes s'écoulent dans cette galerie et élèvent notablement la température sur les chantiers d'élargissement et de maçonnerie.

Boisages. — Dans la région où se sont produites les grandes venues d'eau, du côté Sud, on a rencontré, au point 4.419, une couche de roche broyée, tendre, d'aspect schisteux, qui a donné

lieu à de très grandes difficultés, et c'est la présence de cette couche qui a été la cause principale des retards qui se sont produits dans l'exécution des travaux. Cette roche est un schiste micacé calcaire à grain grossier complètement décomposé. Le calcaire qui précède repose en discordance contre le schiste broyé. La surface de contact constitue, d'après M. le professeur Schardt, une faille très nette, ce qui explique l'état de trituration extrême de cette couche. Cette partie exigeait un boisage immédiat. On l'effectua d'abord au moyen de bois ronds de sapin de faibles dimensions sans semelles et sans contreventements. Mais il se produisit des mouvements et on dut renforcer le boisage. Malgré cette consolidation, les mouvements continuèrent et on dut renouveler tout le boisage. Plus tard, on remplaça, à partir du point 4^k,450, les boisages par des cadres en fers double T présentant une section libre de 2,50 sur 2,80. Pour faciliter la pose de ces cadres métalliques dans la partie de la galerie de base non encore ouverte, on commença par excaver une petite galerie ayant une section libre de 1^m,40 sur 1 mètre dans laquelle on plaçait des cadres en chêne. La distance des cadres en fer variait de 0,41 à 0,86 d'axe en axe. L'intervalle restant libre entre les cadres était garni de béton de ciment. La partie la plus difficile s'est étendue sur une vingtaine de mètres de longueur; on y a posé 43 cadres métalliques.

L'avancement, dans ces conditions, était extrêmement lent. Pendant le mois de décembre 1901, il n'a été que de 2 mètres. Pendant les trois mois suivants, l'avancement a été de 15 mètres.

Dans la traversée du gneiss d'Antigorio, on a constaté un phénomène curieux. Cette roche étant très résistante et compacte, on pouvait croire que des boisages ne seraient pas nécessaires. Or, il n'en a pas été ainsi. On a constaté, en effet, que le gneiss se détachait par plaques, qui étaient parfois projetées avec violence et pouvaient blesser les ouvriers. Ce phénomène paraît être le résultat de la rupture d'équilibre qui se produit par suite de la mise à nu de la roche soumise à une énorme pression et rappelle les larmes bataviques. Les rapports trimestriels sur les travaux ne contiennent pas de renseignements détaillés sur le phénomène

dont il s'agit. Nous trouvons seulement, dans le rapport relatif au 1^{er} trimestre 1901, la courte mention suivante :

« Par suite du refroidissement, les couches de faite éclatent et s'effritent par places, ce qui donne souvent lieu à des détonations et doit être attribué à l'état de tension instable de la roche. La partie revêtue de 2^k,605 à 2^k,645 est sous l'influence de ce mouvement et l'on y constate de nombreux écrasements des moellons artificiels en béton de la voûte. »

Mais M. le professeur Schardt a signalé avec quelques détails ce phénomène dans une lettre, en date du 12 mai 1902, adressée à M. l'ingénieur E. Stockalper, de Sion, et qui est reproduite par le *Bulletin technique de la Suisse romande*, numéro du 10 juillet 1903. Nous croyons utile de reproduire une partie de cette lettre.

« En terrain granitique, ces détentes peuvent se produire aussi bien au plafond que sur les parois. Elles semblent cependant plus rares sur le seuil. Pourtant, j'ai vu le canal en béton dans la galerie II du tunnel, à Iselle, rompu à l'occasion d'une détente produite dans le tunnel I. Au Simplon, la proportion et l'intensité de ces détentes est sensiblement réduite par l'effet des grands coups de mine de l'avancement sur la structure du rocher. Le gneiss granitoïde d'Antigorio devient plaqueté parallèlement à l'allongement des coups, si bien que les parois se détachent lame par lame, dont l'épaisseur est parfois de moins de 0^m,01. Cette modification va souvent à plus de 1 mètre de profondeur, puis on rencontre de nouveau la roche compacte. Les gneiss massifs granitoïdes, la protogine, le granit, en un mot, toutes les roches cristallines non schisteuses ont la propriété d'être très fissurées, formation qui est encore accentuée par l'effet des explosions des grands coups de mine. La détente violente du rocher se trouve ainsi plus réduite et rendue plus continue, donc moins saccadée et moins violente. Mais c'est précisément dans ces roches-là, qui semblent être les plus résistantes et les plus dures, que le boisage est nécessaire. Dans les gneiss d'Antigorio de l'attaque d'Iselle du tunnel du Simplon, on a boisé et étançonné, non seulement le plafond, mais aussi les parois de la grande excavation, tandis que dans les schistes lustrés et les gneiss schisteux du côté de Brigue, on a fait l'excavation de

la grande section sur de grandes longueurs sans aucun boisage. On avait parlé primitivement, c'est-à-dire dans les anciens projets, de la possibilité de laisser sans revêtement la partie du tunnel traversant le gneiss d'Antigorio; or, *c'est précisément dans ce terrain que le revêtement en maçonnerie est le plus nécessaire!* »

Exécution de la section complète du tunnel. — Le système adopté au Simplon pour achever le déblai de la section est celui que l'on avait suivi à l'Arlberg et qui avait donné de bons résultats. Il consiste à faire suivre le percement de la galerie de base de celui d'une galerie de faite au moyen de puits verticaux d'environ deux mètres de côté percés jusqu'au sommet de la section. La galerie de faite a 2 mètres de largeur sur 2^m,50 de hauteur environ. Elle est percée entièrement à la main, de même que les puits verticaux; mais, comme on peut multiplier les attaques, il est facile d'obtenir un avancement aussi rapide que celui de la galerie de base. Les deux galeries sont séparées par un massif de roche qu'on laisse intact jusqu'au moment du battage au large.

Pour faciliter les transports, on perce dans ce massif des trous verticaux sous lesquels viennent se placer les wagons circulant dans la galerie de base, et que l'on charge ainsi avec une grande facilité.

Pour aérer les chantiers établis dans la galerie de faite, on suspend, à l'avant des trous verticaux, des rideaux de toile qui renvoient dans les chantiers supérieurs une partie de l'air de la ventilation principale.

Lorsque la température de la roche est élevée, comme cela a eu lieu du côté Nord, il est difficile, avec ce système, d'obtenir une température convenable pour que les ouvriers puissent travailler sans être incommodés. Aussi, on a dû l'abandonner de ce côté pour revenir au système qui avait été adopté au Mont-Cenis et qui consiste en une attaque par gradins occupant toute la largeur de la section. Les chantiers supérieurs communiquent ainsi avec la galerie de base par une large section qui facilite l'aération et par suite l'abaissement de la température. Le chargement des déblais sur les wagons s'effectue au moyen de trous verticaux comme

dans le système de l'Arlberg. Ce système ne peut s'employer commodément que lorsque la roche n'exige pas d'étais; dans le cas contraire, il est préférable de recourir à une galerie de faite.

Les maçonneries s'exécutent en commençant par les piédroits. Les maçons travaillent en deux relais de 8 heures, de 6 heures du matin à 10 heures du soir. Par suite de la difficulté de se procurer de la pierre de taille en quantité suffisante, une grande partie de la voûte du tunnel I a été exécutée en voussoirs artificiels de béton de ciment. Cet emploi était prévu par l'article 8 du cahier des charges de l'entreprise.

Le type ordinairement adopté pour les revêtements est celui qui porte le n° 2, et que nous avons figuré page 17; il comporte une épaisseur de 0^m,35 pour la voûte. L'excavation correspondante à ce type est de 31^m²,10; mais, dans la pratique, elle est augmentée d'environ 10 p. 100 et portée à 34^m²,20 en moyenne. La section du vide est de 23^m²,20.

Dispositions en faveur des ouvriers. — L'article 16 du cahier des charges prescrit diverses mesures destinées à assurer le bien-être des ouvriers. La température des chantiers ne doit pas dépasser 25°; tous les chantiers doivent être alimentés en eau potable et les déjections doivent être soigneusement enlevées à l'intérieur du tunnel, ainsi qu'aux abords; des bains gratuits doivent être mis à la disposition des ouvriers; des logements salubres et des vivres de bonne qualité doivent leur être fournis aux prix de revient. Enfin, pour empêcher l'exploitation des ouvriers par les tâcherons, il est interdit à ceux-ci de tenir des cantines ou des magasins de vivres.

L'article 24 prescrit la création d'une caisse de secours pour les ouvriers atteints de maladies ou de blessures par suite des travaux, ainsi que pour leurs veuves et orphelins.

La température exceptionnelle rencontrée dans la roche n'a pas permis d'observer le maximum de 25° prescrit pour la température sur les chantiers, et ce maximum a été dépassé de 5 à 6 degrés. Mais l'expérience a démontré qu'avec une grande abondance d'air pur, les ouvriers pouvaient travailler dans une température de 30 ou 31° sans que leur santé eût à en souffrir.

Toutes les autres prescriptions du contrat ont été libéralement observées.

Des bains avec douches et séchoirs pour les vêtements sont établis près de chaque tête et sont reliés au tunnel par des galeries couvertes. Avant d'entrer dans le tunnel, les ouvriers quittent leurs vêtements ordinaires pour revêtir des vêtements de travail. A la sortie du tunnel, ils reprennent les vêtements secs qu'ils ont déposés à l'entrée et laissent les vêtements mouillés, qui sont séchés pour la reprise suivante du travail. Les ouvriers qui le désirent prennent des bains ou des douches, et cette faculté est assez appréciée, car le tiers environ des ouvriers en profite.

En ce qui concerne le logement et les vivres, l'Entreprise, s'appuyant sur l'expérience des travaux du Gothard, qui avait montré que l'ouvrier n'accepte pas volontiers la discipline inhérente au système des casernements et préfère souvent pourvoir librement à ses besoins, même au prix d'une augmentation de dépense, a pris des mesures pour mettre des logements et des vivres à la disposition des ouvriers, mais sans les obliger à en faire usage. Elle a installé des maisons ouvrières, des cantines et des magasins de vivres, et les ouvriers sont libres d'y recourir ou bien d'utiliser les installations établies par des particuliers. A la caserne de Naters, du côté Nord, qui peut loger 100 ouvriers, le prix de la pension et du logement est de 1 fr. 10 par jour. La pension comprend le déjeuner du matin (café au lait et pain) pour 0 fr. 15, le dîner (soupe, viande et légume) pour 0 fr. 50, le souper (soupe aux légumes et pain) pour 0 fr. 25 ; le coucher est compté 0 fr. 20. Au restaurant du tunnel, le prix de la pension est de 1 fr. 90 par jour, y compris un litre de vin.

L'Entreprise remet aux ouvriers des carnets de bons de 5, 10 et 20 centimes, d'une valeur totale de 10 francs, avec lesquels ils peuvent payer leurs acquisitions.

Du côté Sud, les dispositions sont analogues. Le prix de la pension et du logement est aussi de 1 fr. 10.

A part les ouvriers employés aux fronts d'attaque, tous les autres sont libres de chômer le dimanche. Les travaux d'abatage et de maçonnerie sont d'ailleurs suspendus le dimanche.

La durée normale de la journée de travail est de 8 heures. Les ouvriers sont amenés sur les chantiers par des trains. La durée des transports est comptée en plus des 8 heures.

Les salaires des ouvriers employés à l'intérieur du tunnel étaient les suivants au commencement de l'année 1899.

	Côté Nord	Côté Sud
Mineurs pour la perforation mécanique.	4.50	4.00 à 4.40
Marineurs	3.60	3.00 à 3.30
Mineurs à la main	3.50	3.30 à 3.50
Manœuvres	3 00	2.80 à 3.00
Maçons	4 00	
Petits ouvriers	2.00	1.40 à 2.00

L'Entreprise alloue en outre aux ouvriers employés à l'avancement des primes mensuelles qui augmentent sensiblement leurs salaires. Les salaires indiqués ci-dessus ont été un peu augmentés plus tard.

Le nombre des ouvriers employés à l'intérieur du tunnel est d'environ 1.200 pour le côté Nord et 1.000 pour le côté Sud.

Grâce aux différentes mesures prises, l'état sanitaire des ouvriers est resté toujours remarquablement satisfaisant, surtout si l'on tient compte des conditions réellement pénibles, au point de vue de la température et de l'humidité, dans lesquelles ils ont eu à travailler. On a surtout évité l'épidémie, désignée sous le nom d'*anémie des mineurs*, et qui a causé tant de ravages sur les chantiers du Gothard. Cette maladie est produite, comme on le sait, par la présence, dans l'intestin, de vers minuscules appelés *ankylostomes*, et elle est d'autant plus redoutable qu'il suffit d'un individu contaminé pour propager la maladie dans tous les chantiers. Les déjections du malade, abandonnées le long des galeries, se mélangent à la boue et les œufs du parasite qu'elles contiennent donnent bientôt naissance à des embryons. Les ouvriers déposent à terre leurs vêtements, leurs pipes ; ils s'asseyent sur le sol pour manger, déposent par terre leur pain et les utensils dont ils se servent ; ils ont ainsi bien des chances d'absorber des parcelles de cette boue contaminée et d'introduire dans leurs intestins le parasite, cause du

mal. L'invasion de cette maladie a été évitée au Simplon par deux ordres de précautions. En premier lieu, on soumet à une visite médicale tous les ouvriers qui se présentent pour être embauchés, et on examine avec soin s'ils ne présentent pas les symptômes de la terrible maladie. L'attention des médecins est, en outre, constamment en éveil de manière à arrêter, dès le début, tout cas suspect qui viendrait à se produire. Enfin, on établit des latrines suffisamment rapprochées pour éviter, autant que possible, le dépôt des déjections sur le sol des galeries ; la vidange de ces latrines s'effectue avec le plus grand soin, ce qu'il est facile de faire par suite de la grande quantité d'eau qu'il est nécessaire d'envoyer dans le tunnel, soit pour la perforation, soit pour la réfrigération.

L'expérience du Simplon prouve, d'une manière concluante, que l'anémie des mineurs n'est nullement la conséquence de la chaleur et de l'humidité, comme on le croyait lors de l'exécution des travaux du Gothard, mais doit être attribuée aux mauvaises conditions hygiéniques et à l'air vicié dans lequel travaillaient les ouvriers. Avec une ventilation abondante et, de plus, avec des mesures de précaution convenables, il est facile d'éviter la maladie.

Les caisses de secours pour les ouvriers malades prévues par l'article 24 du cahier des charges ont été établies par l'Entreprise, qui a en outre assuré tout le personnel contre les accidents. Les fonds des caisses de secours proviennent exclusivement des versements de l'Entreprise. Le fonctionnement de chaque Caisse est placé sous la surveillance d'un Comité composé de cinq membres désignés par l'Entreprise, mais dont deux au moins doivent être choisis parmi les ouvriers.

V. — RENSEIGNEMENTS STATISTIQUES SUR L'EXÉCUTION DES TRAVAUX

Les rapports trimestriels présentés au Comité fédéral fournissent, sur la marche des travaux, des renseignements qui nous ont permis de calculer les diverses moyennes contenues dans les tableaux ci-après :

Année	Trimestre	Longueur perforée mécaniquement		Avance- ment total à partir de l'origine Sud	Section moyenne du front d'attaque	Nombre moyen de trous de mine sur le front d'attaque	Profon- deur moyenne des trous de mine	Temps employé pour forer 1 ^m de profon- deur	Nombre d'affûtages	
		pendant le trimestre	par jour de forage						par mètre cube de déblai	par mètre d'avan- cement
1898	4	46	4,50	76	"	"	"	minutes "	"	"
	1	288	3,20	364	5,30	10,9	1,37	75	9,9	52,5
1899	2	331	3,63	695	5,40	11,5	1,43	60	11,6	62,5
	3	438	4,87	1133	5,50	11,4	1,33	40	9,6	52,8
	4	433	4,76	1566	5,60	11,7	1,26	39	12,3	69,3
	1	426	4,73	1992	5,40	11,9	1,23	40	11,9	62,9
1900	2	400	4,49	2392	5,50	13,3	1,22	40	14,8	81,0
	3	376	4,09	2768	6,00	12,2	1,25	45	14,3	82,2
	4	380	4,22	3148	6,40	10,9	1,30	45	10,3	61,0
	1	462	5,13	3610	6,00	11,5	1,18	42	12,4	73,4
1901	2	367	4,62	3977	5,53	10,6	1,18	48	12,2	69,1
	3	420	4,88	4397	5,80	10,4	1,23	45	10,3	59,7
	4	49	2,71	4428	5,80	12,7	1,30	30	2,4	13,8
	1	"	"	"	"	"	"	"	"	"
1902	2	306	7,37	4786	6,20	11,1	1,33	24	2,9	17,9
	3	575	6,28	5361	6,00	12,4	1,24	30	8,1	48,0
	4	498	5,59	5859	5,90	15,2	1,20	28	10,7	63,0
	1	471	5,29	6330	6,10	19,4	1,20	32	13,4	79,1
1903	2	436	5,01	6766	6,30	14,5	1,20	40	12,4	74,3
	3	503	6,13	7275	6,00	13,8	1,20	32	7,7	46,0
	4	477	5,45	7752	6,20	13,7	1,20	36	11,0	68,1
	1	430	4,73	8182	6,43	13,4	1,20	36	9,5	61,3
1904	2	537	6,03	8719	6,70	12,6	1,20	34	9,5	63,5
	3	391	5,97	9110	6,40	11,9	1,20	34	8,5	54,7
	4	48	2,46	9162	6,40	12,1	1,20	43	12,4	74,3

MECANIQUE.

d'Iselle.

Trimestre	Longueur de fleuret usée			Dynamite employée		Temps employé par mètre d'avancement		Observations
	par mètre de trou de mine	par mètre cube de déblai	par mètre d'avancement	par mètre cube de déblai	par mètre d'avancement	pour la perforation	pour le chargement et le déblaiage	
4	"	"	"	kil.	kil.	heures	heures	<p>La perforation mécanique a commencé, du côté d'Iselle, le 21 décembre 1898.</p> <p>L'avancement total comprend les parties perforées à la main aussi bien que celles perforées à la machine; il donne la situation à la fin du trimestre.</p> <p>L'origine Sud est à la tête de la galerie de direction.</p> <p>Les chiffres relatifs aux longueurs de fleuret usées et qui sont soulignés ont été calculés proportionnellement aux nombres des affûtages, parce que les longueurs totales de fleuret usées pendant les trimestres correspondants ne sont pas données par les rapports trimestriels.</p>
1	0,060	0,424	0,66	5,66	30,0	4,53	2,77	
2	0,068	0,445	0,78	4,76	25,7	3,60	2,88	
3	0,058	0,420	0,66	4,84	26,5	2,31	2,30	
4	0,074	0,454	0,87	4,95	27,9	2,57	2,36	
1	0,066	0,448	0,79	4,83	25,6	2,64	2,38	
2	0,076	0,484	1,01	5,44	28,3	2,98	2,35	
3	0,083	0,478	1,02	4,68	26,9	3,06	2,66	
4	0,069	0,428	0,76	3,53	20,9	2,78	2,83	
1	0,080	0,456	0,92	4,76	28,1	2,63	2,01	
2	0,081	0,453	0,86	4,56	25,7	2,80	2,40	
3	0,072	0,429	0,75	4,21	24,4	2,64	2,24	
4	0,042	0,027	0,16	3,77	21,8	3,24	4,38	
1	"	"	"	"	"	"	"	
2	0,020	0,036	0,22	4,08	25,5	1,46	1,80	
3	0,049	0,101	0,60	5,18	30,8	1,99	1,81	
4	0,052	0,133	0,79	5,64	33,3	2,31	1,60	
1	0,051	0,167	0,99	5,98	33,3	2,63	1,88	
2	0,064	0,155	0,93	4,74	28,4	2,44	2,32	
3	0,042	0,097	0,58	5,88	35,0	1,80	2,10	
4	0,062	0,137	0,85	5,01	31,0	2,01	2,38	
1	0,057	0,119	0,77	4,37	28,1	1,98	3,02	
2	0,063	0,118	0,79	4,83	32,4	1,80	2,19	
3	0,058	0,106	0,68	4,43	28,4	1,70	2,30	
4	0,093	0,156	0,94	4,99	29,9	2,49	3,05	

VENTILATION, EAU COMPRIMÉE

Côté d'Iselle.

Année	Trimestre	Avancement à la fin du trimestre	Température moyenne de la roche	Température moyenne de l'air		Cube d'air introduit par seconde		Volume d'eau comprimée envoyé par seconde	Pression de l'eau (pour la perforation)	
				à l'extérieur	au front d'attaque	dans la galerie II	au front d'attaque de la galerie I		Initiale	au front d'attaque
1898	4	76	"	"	"	m. c.	m. c.	litres.	atm.	atm.
	1	364	"	10,7	160,3	"	"	"	"	"
1899	2	695	20°,8	13,0	23,2	4,0	0,60	"	"	"
	3	1.133	26°,2	18,1	26,2	6,7	0,38	5,8	95	85
	4	1.566	30°,0	4,7	26,6	4,7	0,29	10,0	95	85
	1	1.992	31°,8	"	26,0	5,2	0,48	16,2	95	85
1900	2	2.392	33°,5	13,2	25,1	8,0	0,47	18,5	87	77
	3	2.768	31°,8	17,6	24,9	20,0	0,67	11,1	80	70
	4	3.148	31°,6	6,0	27,3	23,3	0,65	8,0	80	70
	1	3.610	29°,2	0,0	26,0	24,1	0,55	9,0	85	70
1901	2	3.977	26°,4	13,6	28,4	32,2	0,62	11,0	83	70
	3	4.397	22°,5	17,0	26,4	30,8	0,67	12,5	88	75
	4	4.428	17°,2	4,3	21,1	27,6	0,64	12,0	78	65
	1	"	"	3,2	"	"	"	"	"	"
1902	2	4.786	21°,3	12,8	22,5	17,4	0,49	15,2	91	76
	3	5.361	29°,0	16,6	27,5	19,4	0,82	19,5	90,4	76
	4	5.859	35°,3	5,0	28,0	30,7	0,87	20,2	91	75
	1	6.330	37°,5	3,5	27,1	33,0	2,08	17,0	92	76
1903	2	6.766	38°,4	12,0	26,6	31,7	1,87	21,9	92	76
	3	7.275	37°,8	16,6	27,2	28,6	2,06	31,4	93	76
	4	7.752	38°,6	5,6	27,4	28,2	2,11	21,3	93	77
	1	8.182	38°,8	2,6	28,2	31,3	1,97	23,0	93	76
1904	2	8.719	39°,4	14,5	28,8	25,4	2,01	26,6	93	78
	3	9.110	42°,0	17,7	28,0	27,3	1,82	29,9	103	86
	4	9.162	45°,0	5,6	31,1	28,5	2,27	80,0	103	83

Côte d'Iselle.

Position des points observés	Hauteur superposée	Température de la roche	Importance des sources	Température des sources	Nature des terrains
800	375	26, 2			
1.000	425	27, 4			
1.200	530	28, 9			
1.400	640	30, 0			
1.600	750	31, 4			
1.800	900	31, 8			
2.000	1.000	33, 0			
2.200	1.050	33, 5			
2.400	1.110	33, 1	1	33°	Gneiss d'Anligorio.
2.600	1.175	34, 8			
2.800	1.350	34, 8			
3.000	1.475	34, 6	2	32	
3.200	1.600	34, 4			
3.400	1.550	29, 2			
3.600	1.500	28, 0			
3.800	1.450	26, 4	5	28	
4.000	1.400	26, 5	5	18 à 25°	
4.200	1.300	22, 5	5	13 à 16	
4.400	1.200	17, 2	2	20°	Calcaire dolomitique et schiste à anhydrite.
4.600	1.225	21, 3			Schistes calcaires équivalents des schistes lustrés.
4.800	1.250	23, 0	2	26	
5.000	1.550	26, 0	2	26 à 29°	Gneiss avec galets.
5.200	1.770	29, 0			
5.400	1.750	31, 4			
5.600	1.750	34, 6			
5.800	1.750	35, 3			
6.000	1.750	36, 6			
6.200	1.725	37, 5			
6.400	1.700	38, 5			
6.600	1.675	38, 4			
6.800	1.650	36, 8	3	39	
7.000	1.625	39, 0			Calcaire dolomitique et schistes micacés calcarifères.
7.200	1.575	37, 8			
7.400	1.600	38, 8			

4. — PERFORATION A LA MAIN

Année	Trimestre	Côté de Brigue				Côté d'Iselle			
		Nombre de journées par mètre cube		Dynamite employée par mètre cube		Nombre de journées par mètre cube		Dynamite employée par mètre cube	
		Galerie de faite	Abatages	Galerie de faite	Abatages	Galerie de faite	Abatages	Galerie de faite	Abatages
				kil.	kil.			kil.	kil.
1899	1	"	"	"	"	"	"	"	"
	2	"	4,96	"	0,56	6,02	4,03	2,90	0,78
	3	"	4,57	"	0,56	5,70	6,42	0,63	1,44
	4	5,05	3,36	0,90	0,57	11,24	2,57	1,75	0,60
1900	1	4,79	2,30	1,66	0,37	13,84	2,94	1,94	0,62
	2	5,05	2,85	2,48	0,67	12,31	3,49	1,69	0,49
	3	5,81	3,55	3,01	0,81	11,24	2,57	1,75	0,60
	4	5,28	2,96	2,49	0,75	14,04	2,40	1,50	0,58
1901	1	4,50	2,49	1,94	0,60	9,68	3,33	1,60	0,46
	2	4,98	2,48	2,72	0,65	8,20	3,08	1,78	0,35
	3	6,84	3,55	3,78	0,90	11,36	2,83	2,00	0,47
	4	8,88	2,55	3,59	0,87	12,06	4,04	3,62	0,46
1902	1	9,94	2,47	3,59	0,76	14,05	4,92	1,87	0,48
	2	9,75	3,39	5,04	0,79	9,90	3,70	2,12	0,40
	3	8,61	1,91	3,55	0,59	8,38	3,76	2,01	0,40
	4	"	"	"	"	"	"	"	"
1903	1	7,39	1,78	2,19	0,48	8,86	2,85	1,43	0,40
	2	7,61	1,74	2,08	0,48	"	"	"	"
	3	7,79	3,00	2,09	0,62	"	"	"	"
	4	7,89	2,13	2,10	0,48	"	"	"	"

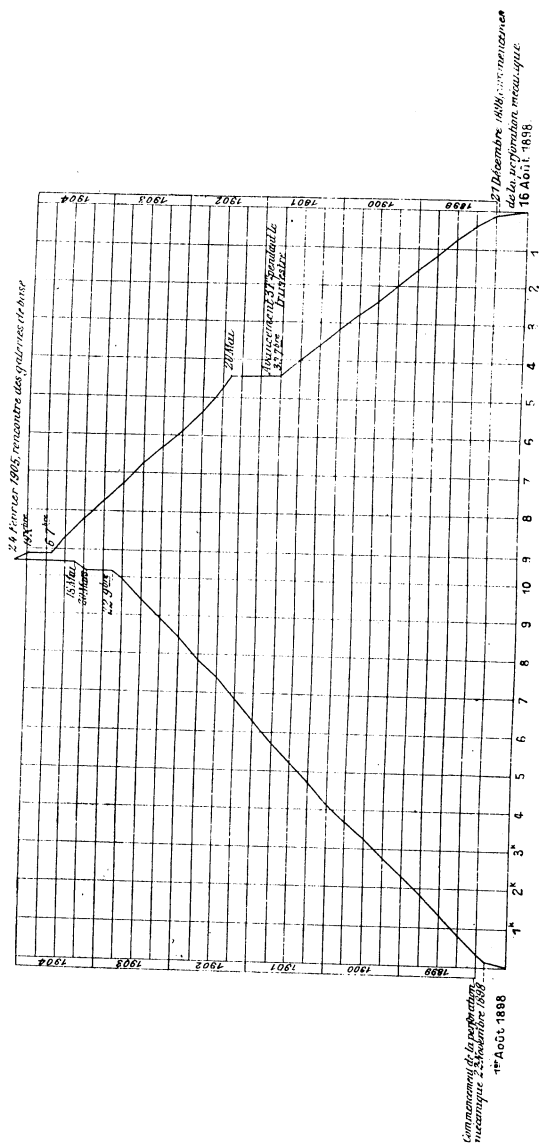
Pour le 4^e trimestre 1902, côté de Brigue et côté d'Iselle, et pour le 2^e, le 3^e et le 4^e trimestre 1903, côté d'Iselle, les bulletins trimestriels donnent les résultats en bloc pour la galerie de faite et les abatages; c'est pour ce motif que ces résultats ne figurent pas dans le tableau ci-dessus. Il en de même pour 1904.

5. — AVANCEMENT ANNUEL ET AVANCEMENT MOYEN ET JOURNALIER DE LA GALERIE DE BASE DU TUNNEL I, Y COMPRIS LES PARTIES PERFORÉES A LA MAIN.

Année	Avancement annuel			Avancement moyen journalier		
	Côté de Brigue	Côté d'Iselle	Ensemble	Côté de Brigue	Côté d'Iselle	Ensemble
	m.	m.	m.	m.	m.	m.
1899	1.967	1.402	3.369	5,39	3,84	9,23
1900	1.819	1.582	3.401	4,98	4,33	9,32
1901	2.216	1.280	3.496	6,07	3,50	9,58
1902	2.134	1.431	3.565	5,85	3,92	9,77
1903	1.675	1.893	3.568	4,59	5,18	9,78
Moyennes...	1.962	1.518	3.480	5,38	4,15	9,53

6. — MOYENNES GÉNÉRALES POUR LES ANNÉES 1899 A 1903
INCLUSIVEMENT

	Côté de Brigue	Côté d'Iselle	Moyennes
<i>Perforation mécanique.</i>			
Section du front d'attaque	5 ^m 77	5,84	5,80
Nombre de trous sur le front d'attaque	9,8	12,6	11,2
Profondeur des trous de mine	1,57	1,25	1,41
Temps employé pour forer 1 mètre de profondeur.	29 minutes.	44	35
Par mètre { Nombre d'affûtages	37,6	61,5	48,5
{ Longueur de fleuret usée.	0,49	0,77	0,62
{ Dynamite employée	23 ^k ,9	28 ^k ,5	26 ^k ,0
d'avancement { Nombre d'heures pour la perforation	1,47	2,53	1,95
{ Nombre d'heures pour le marimage.	2,62	2,31	2,48
<i>Perforation à la main.</i>			
Par mètre cube { Profondeur totale des trous de mine.	7,9	8,0	7,9
de { Dynamite employée	2 ^k ,82	1,77	2,42
galerie de faite. { Nombre total des journées	6,93	11,42	8,50
Par mètre cube { Profondeur totale des trous de mine.	1,78	2,91	2,17
d'abatage. { Dynamite employée	0,65	0,52	0,60
{ Nombre total des journées	2,68	3,33	2,91
Par mètre cube { Profondeur totale des trous de mine.	2,54	3,53	2,93
de galerie { Dynamite employée	0,92	0,67	0,84
de faite { Nombre total des journées	3,20	4,13	3,65
et d'abatage. {			
<i>Revêtements.</i>			
Par mètre cube { Journées de maçon	0,84	0,74	0,79
de { Journées de manœuvre	1,41	1,47	1,44
revêtement. {			
<i>Exécution de la galerie de base du tunnel I.</i>			
Longueur exécutée par an	1.962 ^m	1.518 ^m	3.480
— — par jour	5,38	4,15	9,53



7. — Tableau graphique représentant l'avancement de la galerie de base du tunnel I.

Echelles	} abscisses 0 ^m 005 pour 1 kilomètre. ordonnées 0 ^m 0025 pour 1 trimestre.

8. — ÉVALUATION DU PRIX DE REVIENT DES DÉBLAIS DU TUNNEL
ET DE LA MAIN-D'ŒUVRE DES REVÊTEMENTS D'APRÈS LES
RÉSULTATS DES ANNÉES 1899 A 1903 INCLUSIVEMENT.

Perforation mécanique. — Nous admettrons, d'après les renseignements fournis par les rapports trimestriels, que la composition moyenne d'un poste de perforation mécanique est la suivante :

1 chef de poste,
1 surveillant,
5 servants pour les perforatrices,
5 marineurs,
1 mineur à la main,
3 manœuvres.

Nous ne connaissons pas exactement les salaires payés à ce personnel, y compris les primes; mais nous croyons qu'on peut admettre les chiffres suivants pour des journées de 8 heures :

Chef de poste.	8 fr.,00 par jour.
Surveillant	7 ,00 —
Servants	6 ,00 —
Marineurs	4 ,50 —
Mineurs à la main.	4 ,50 —
Manœuvres	3 ,50 —

Nous admettrons aussi que, pendant la perforation mécanique, la moitié du temps des ouvriers employés au marinage est utilisée pour d'autres travaux.

Ceci posé, on peut évaluer, de la manière suivante, la dépense moyenne du mètre de la galerie d'avancement, d'après les moyennes données au paragraphe 6 qui précède :

	Côté de Brigue	Côté d'Iselle	Moyennes pour l'ensemble
Main-d'œuvre pour la perforation.	8, 27	14, 23	10, 97
— pour le marinage	27, 02	23, 82	25, 58
Main-d'œuvre correspondant au temps perdu, pendant la perforation, par les ouvriers em- ployés au marinage	3, 45	5, 93	4, 57
Dynamite comptée à 3 fr. 00 le kilogramme. . .	81, 70	85, 50	78, 00
Affûtages comptés à 0 fr. 30 l'un.	11, 28	18, 45	14, 55
Fleurets usés comptés à 20 fr. 00 le mètre . .	9, 80	13, 40	12, 40
1 ^m , 00 de tuyau pour l'eau comprimée.	14, 00	14, 00	14, 00
Entretien et amortissement des perforatrices. .	3, 07	3, 95	3, 45
Force motrice pour les perforatrices.	13, 23	17, 14	14, 95
Totaux.	174, 82	198, 42	178, 47

Les perforatrices coûtent environ 5.000 francs l'une, soit 15.000 francs pour les trois qui fonctionnent en même temps. Nous avons admis 40 p. 100 par an pour l'entretien et l'amortissement, soit 6.000 francs pour trois perforatrices et 2.000 francs pour une seule. Cette évaluation paraît être plutôt au-dessus de la réalité.

Les pompes à haute pression coûtent environ 10.000 francs la paire. Nous avons admis que la partie de l'installation servant à fournir la force motrice aux perforatrices vaut 80.000 francs (*), et nous avons compté 25 p. 100 par an pour l'entretien et l'amortissement, plus 6.000 francs pour la surveillance, soit 26.000 francs.

Dans les dépenses indiquées ci-dessus ne sont pas comprises celles relatives au boilage, à la ventilation et à l'abaissement de la température, ni les frais généraux, ni les pertes résultant des arrêts des travaux, sauf, en ce qui concerne ces dernières, celles qui résultent implicitement de la réduction de la moyenne de l'avancement journalier. Les frais de transport hors du tunnel ne sont pas compris non plus.

En rapportant au mètre cube les chiffres trouvés, d'après les sections moyennes des fronts d'attaque, on obtient les résultats suivants :

(*) Ce chiffre de 80.000 francs ne comprend que les pompes à haute pression et le bâtiment qui les abrite, mais non une partie de l'établissement de la chute d'eau et des turbines.

Côté de Brigue.	29 fr., 78 le mètre cube.
Côté d'Iselle.	33 , 97 —
Moyenne	30 , 80 —

La dynamite intervient pour près de la moitié dans les dépenses ci-dessus.

Perforation à la main. — Les dépenses de la perforation à la main peuvent s'évaluer de la manière suivante :

		Côté de Brigue	Côté d'Iselle	Ensemble
		fr.	fr.	fr.
Par mètre cube de galerie de faite.	Journées .	31, 18	50, 04	38, 25
	Dynamite.	8, 46	5, 31	7, 26
	Fleurets .	4, 74	6, 40	5, 52
	Total.	44, 38	61, 75	51, 03
Par mètre cube d'abatage . . .	Journées .	12, 06	14, 98	13, 10
	Dynamite.	1, 95	1, 56	1, 80
	Fleurets .	1, 06	2, 32	1, 52
	Total.	15, 07	18, 86	16, 42
Par mètre cube de galerie de faite et d'abatage.	Journées .	14, 40	18, 58	16, 43
	Dynamite.	2, 76	2, 01	2, 52
	Fleurets .	1, 52	2, 82	2, 06
	Total.	18, 68	23, 41	21, 01

Les dépenses ci-dessus ont été calculées en comptant les journées à 4 fr. 50 l'une, et en admettant que la dépense en fleuret pour 1 mètre de trou de mine soit de 0 fr. 60 pour le côté de Brigue, 0 fr. 80 pour le côté d'Iselle et 0 fr. 70 pour l'ensemble.

Comme pour la perforation mécanique, ces dépenses ne comprennent pas le boisage, la ventilation, l'abaissement de la température, les frais de transport hors du tunnel et les frais généraux.

La section moyenne de l'excavation de la galerie I est, comme nous l'avons dit plus haut, de 34^m²,20, se décomposant ainsi : galerie d'avancement 5,8 ; galerie de faite 5,0 ; abatage 23,40. En appliquant les moyennes indiquées ci-dessus, on trouve pour la dépense totale de l'excavation, non compris les mêmes éléments

que précédemment, 747 fr. 25 par mètre courant pour le côté de Brigue et 947 fr. 10 pour le côté d'Iselle.

Dépenses en main-d'œuvre pour les revêtements. — Ces dépenses, évaluées en comptant à 4 fr. 50 la journée d'un maçon et à 3 fr. 50 celle d'un manœuvre, sont les suivantes pour un mètre cube de revêtement.

	Maçons	Manœuvres	Ensemble
Côté de Brigue	3, 78	4, 94	8, 72
Côté d'Iselle	3, 33	5, 15	8, 48
Moyennes	3, 55	5, 04	8, 59

VI. — CONCLUSIONS

Jusqu'ici nous avons exposé sans commentaires les faits les plus intéressants relatifs à la marche des travaux du tunnel du Simplon. Il convient maintenant d'examiner quels enseignements pratiques on peut en tirer au point de vue du percement des grands tunnels.

L'exécution du tunnel du Simplon a été accompagnée, comme on l'a vu, des circonstances les plus défavorables.

La température de la roche, que l'on supposait devoir être de 40 degrés au maximum, a dépassé 50 degrés. En outre, on a rencontré des sources froides extrêmement abondantes qui ont interrompu pendant près de huit mois les travaux du côté Sud, puis sur le versant Nord, de nombreuses sources chaudes qui ont obligé à arrêter définitivement le percement de la galerie d'avancement le 18 mai 1904, après avoir nécessité plusieurs arrêts provisoires. Enfin, lorsqu'il ne restait plus que 244 mètres de galerie à percer, on a rencontré, sur le côté Sud, une source d'eau chaude, qui a arrêté les travaux pendant trois mois et demi. Le retard total, résultant de la rencontre de ces diverses sources, peut être évalué à

environ une année. Malgré ces circonstances si défavorables, dont les grands tunnels antérieurs n'avaient pas offert d'exemple, les travaux ont été exécutés avec une grande rapidité, ainsi qu'on peut en juger par le tableau comparatif ci-après :

	Mont-Cenis	Gothard	Arlberg	Simplon
Longueur de la galerie de direction.	12.233	14.290	10.246	19.729
Durée totale de l'exécution de la galerie de direction.	13 ans 4 mois.	7 ans 7 mois.	3 ans 5 mois.	6 ans 6 m. 1/2
Longueur de la galerie de direction percée en moyenne par mois	76 ^m , 5	164 ^m	250 ^m	251 ^m , 3
Dépense par mètre courant de tunnel achevé . . .	6.430 fr.	4.470 fr.	4.050 fr.	3.900 fr.

Ainsi, malgré le retard d'une année, causé par l'abondance ou la haute température des sources, l'avancement mensuel des travaux du Simplon a été beaucoup plus considérable qu'au Mont-Cenis et au Saint-Gothard et a même dépassé légèrement l'avancement obtenu à l'Arlberg, où la température maxima a été de 21 degrés seulement et où les difficultés résultant des eaux ont été peu importantes. Si l'on fait abstraction de ce retard d'une année, dû à des circonstances tout à fait exceptionnelles, on trouve que l'avancement moyen de la galerie de direction a été de 303 mètres par mois, soit 21 p. 100 de plus qu'à l'Arlberg.

La dépense de 3.900 francs par mètre courant de tunnel a été calculée de la manière suivante :

Montant du premier forfait de l'entreprise.	54.500.000 fr.
Montant du second forfait (achèvement du second tunnel)	15.000 000
Supplément alloué par la convention additionnelle du 9 octobre 1903, environ . .	8.000.000
Total	<u>77.500.000</u>

Le premier forfait comprenant les travaux de ballastage et de pose de la voie, on peut admettre que l'exécution des deux tunnels, non compris l'établissement de la voie, ni les frais généraux de la Compagnie du Jura-Simplon, entraînera une dépense de 77 millions

en nombre rond. Il est même possible que cette dépense ne soit pas atteinte si l'administration des chemins de fer fédéraux confie à une entreprise spéciale l'achèvement du second tunnel, ainsi qu'elle s'en est réservé la faculté. En divisant cette somme de 77 millions par la longueur réelle du tunnel, soit 19.770 mètres, on trouve 3.895 francs, ou 3.900 francs en chiffre rond.

Les dépenses par mètre courant pour le Mont-Cenis, le Gothard et l'Arlberg, qui figurent dans le tableau précédent, sont extraites de l'ouvrage de M. Pontzen, intitulé : *Travaux de terrassement, tunnels, etc...* Il en est de même des autres renseignements donnés sur ces mêmes tunnels.

Si l'on n'avait pas rencontré, pour le Simplon, des conditions exceptionnellement défavorables, qui ont motivé des allocations supplémentaires importantes, l'exécution du tunnel n'aurait coûté que 3.500 francs le mètre courant.

On voit donc qu'en définitive l'exécution du tunnel du Simplon est, par rapport aux grands tunnels antérieurs, caractérisée par une augmentation de la rapidité des travaux et une diminution de la dépense. Le tableau précédent montre qu'il en a été ainsi pour chaque nouveau grand tunnel exécuté dans les Alpes, fait qui n'a rien de surprenant, car il est la conséquence des progrès réalisés dans l'art d'exécuter les grands tunnels et de l'expérience antérieurement acquise.

Toutefois, la diminution de la dépense, en ce qui concerne le Simplon, est remarquable tant à cause des difficultés exceptionnelles rencontrées que parce qu'on a exécuté deux tunnels à simple voie, au lieu d'un seul à double voie, ce qui augmente notablement la section totale de l'excavation et exige la perforation de deux galeries d'avancement, au lieu d'une seule, et de deux galeries de faite, c'est-à-dire augmente de beaucoup la proportion relative des parties coûteuses.

Les travaux du tunnel du Simplon constituent, à notre avis, un très grand progrès dans l'art d'exécuter les grands tunnels. Ils ont montré quelle est l'importance pratique d'une ventilation abondante dans ce genre de travaux et établi la possibilité de faire travailler les ouvriers sous une température de 30 et même 32 degrés

sans qu'il en résulte aucun inconvénient sérieux, aussi bien au point de vue de l'état sanitaire, qu'au point de vue du bon rendement du travail, mais à la condition d'une ventilation énergique et en outre de mesures hygiéniques convenables. Cette ventilation énergique remplit un double rôle : elle abaisse la température de l'air dans lequel doit s'effectuer le travail, et elle permet en outre aux ouvriers de supporter plus facilement une température élevée. La première partie de ce double rôle était évidente à l'avance ; la seconde pouvait être présumée, car l'expérience a depuis longtemps démontré qu'on souffre bien moins d'une température élevée quand l'air est en mouvement. Il n'était pas certain cependant que des inconvénients ne se révéleraient pas dans la pratique ; on pouvait craindre, notamment l'influence fâcheuse, sur la santé des ouvriers, de courants d'air animés d'une grande vitesse (environ 6 mètres par seconde). L'expérience a heureusement démontré que ces craintes n'étaient pas fondées et qu'une ventilation énergique permet, comme nous l'avons dit, une marche normale du travail avec une température de 31 ou 32 degrés, qui serait difficilement supportable si l'air était animé d'une faible vitesse. On doit se féliciter de ce que l'entreprise du percement du Simplon a eu pleine confiance dans l'efficacité des procédés nouveaux qu'elle se proposait de mettre en œuvre et ne s'est pas laissé arrêter par la crainte des aléas qui pouvaient se présenter. Grâce à sa courageuse initiative, l'art de l'Ingénieur est aujourd'hui en possession d'une méthode précise et sûre pour le percement des grands tunnels, et l'on peut, sans crainte d'insuccès, affronter le percement d'un tunnel plus long que celui du Simplon, pourvu toutefois que la température de la roche ne dépasse pas 50 degrés environ et que l'on ne se trouve pas en présence de sources chaudes trop abondantes. Le mérite des entrepreneurs du tunnel du Simplon est d'autant plus grand que l'expérience du Gothard était loin d'être encourageante. M. de Stockalper, Ingénieur à Sion, ancien chef de service de la tête du Nord du tunnel du Gothard, a résumé, dans un mémoire publié en 1883, sous le titre « *Les grands tunnels Alpains et la chaleur souterraine* », son opinion personnelle sur cette question, ainsi que celle des personnes les plus compétentes. On considérait

à cette époque que, lorsque la température interne atteint une trentaine de degrés, le travail des ouvriers devient très pénible, leurs santé s'altère et qu'il en résulte nécessairement une augmentation considérable dans la dépense des travaux. L'expérience du Simplon a heureusement montré qu'une ventilation abondante permet de surmonter ces difficultés.

Telles sont les réflexions générales qui se présentent à l'esprit lorsqu'on examine les travaux du Simplon. Mais il est intéressant de se demander, en outre, s'il ne sera pas possible d'introduire à l'avenir de nouvelles améliorations et quelles seront ces améliorations.

Une première question se pose. L'exécution de deux tunnels à une voie offre une solution sûre du problème ; mais elle est coûteuse. Aussi, il est naturel de se demander si cette solution est indispensable. Nous croyons que la réponse à cette question dépend essentiellement de la température maxima de la roche et que, si cette température ne dépasse que d'un petit nombre de degrés celle sous laquelle on peut faire travailler les ouvriers, et qui est de 30 ou 31 degrés, le percement de deux galeries n'est pas indispensable. Si, par exemple, la température maxima de la roche ne dépasse pas environ 40 degrés, et si d'ailleurs les eaux ne sont pas trop abondantes, nous croyons qu'on peut ne percer qu'une seule galerie, en adoptant, pour la ventilation, une disposition proposée, il y a longtemps déjà, par M. de Stockalper, qui s'est beaucoup occupé de questions relatives au percement des grands tunnels et dont nous avons déjà eu l'occasion de citer le nom. Cette disposition, que son auteur a rappelée dans une étude récente relative à l'établissement d'une ligne directe de Berne à Brigue (*), consiste essentiellement à diviser en deux parties la longueur de tunnel terminée et à utiliser l'une de ces parties comme canal de ventilation. M. de Stockalper se contente, pour effectuer cette division, d'une simple toile AB (*fig. 13*), suspendue d'une paroi à l'autre. Mais nous croyons que, pour faciliter la ventilation secondaire

(*) De Stockalper. — Wildstrubel et Loetschberg. Etude de la traversée des Alpes Bernoises (n^{os} du 25 juin et du 10 juillet 1903 du *Bulletin technique de la Suisse Romande* (Lausanne)).

et, en même temps, les transports, il convient d'employer une cloison rigide CD (*fig. 14*) formée de poutrelles soutenues par des tirants EF, E'F', et entre lesquelles on disposerait des toiles gou-

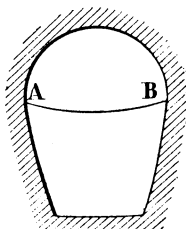


Fig. 13.

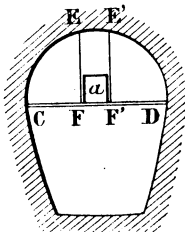


Fig. 14.

dronnées. Le vide supérieur CEE'D servirait pour la ventilation primaire et remplacerait la galerie parallèle du tunnel du Simplon. Jusqu'ici, il n'y a, on le comprend sans peine, aucune difficulté pratique. C'est pour la ventilation secondaire que les difficultés apparaissent. Au Simplon, où les deux galeries sont reliées par des transversales distantes de 200 mètres, la ventilation secondaire ne s'applique qu'à l'extrémité de la galerie d'avancement, sur une longueur qui ne dépasse pas beaucoup 200 mètres, et les chantiers de la galerie de faite, de l'abatage et des maçonneries sont desservis directement par la ventilation primaire. Il en serait tout autrement avec la disposition proposée par M. de Stockalper. Dans ce cas, en effet, la ventilation primaire ne pourrait desservir que les chantiers de maçonnerie, faisant immédiatement suite à la partie achevée du tunnel, et tous les autres chantiers devraient être desservis par la ventilation secondaire.

Voici comment la difficulté nous paraît pouvoir être résolue. La ventilation secondaire s'effectuerait au moyen d'un tuyau *a*, placé dans la partie supérieure CEE'D, destinée à la ventilation primaire. Ce tuyau *a* serait exécuté en planches, ce qui aurait le double avantage d'empêcher l'échauffement de l'air intérieur et d'entraîner une faible dépense ; il partirait de l'origine du tunnel, de sorte que la ventilation primaire et la ventilation secondaire auraient le même point de départ. Cette disposition a pour but

d'obtenir que l'air de la ventilation secondaire soit à la plus basse température possible. Arrivé à l'extrémité de la partie achevée du tunnel, le tuyau *a* se prolongerait par un tuyau métallique reposant sur le sol, sauf au voisinage du front d'attaque, où il se relèverait pour laisser la place disponible pour les manœuvres du chantier extrême. Des prises d'air seraient pratiquées sur ce tuyau métallique, de manière à pouvoir ventiler directement les chantiers d'élargissement de la galerie d'avancement, indépendamment de la ventilation produite par l'air revenant du front d'attaque.

Par suite de cette disposition, l'air destiné à la ventilation secondaire s'échaufferait fort peu jusqu'à l'extrémité de la partie achevée du tunnel ; au delà, il serait facile de le refroidir, si c'était nécessaire, en plaçant de la glace sur le parcours du tuyau métallique. Si l'on a soin de ne pas laisser une trop grande distance entre l'extrémité de la partie terminée du tunnel et le front d'attaque, si de plus la température de la roche ne dépasse pas 40 degrés, comme nous l'avons supposé, il sera facile d'envoyer un volume d'air suffisant pour que la température sur les divers chantiers ne dépasse pas sensiblement 30 degrés. Il est bien entendu, d'ailleurs, que ces chiffres ne prétendent pas à une précision rigoureuse et peuvent varier suivant les circonstances, notamment suivant la température de l'air extérieur.

Nous nous bornons à ces indications sommaires, destinées à montrer qu'avec le maximum supposé pour la température de la roche on peut se dispenser de percer deux galeries. Si l'on donne au tunnel la section nécessaire pour une double voie, l'économie réalisée peut être évaluée à près de 500 francs par mètre courant, en la calculant d'après les prix moyens du Simplon. Si l'on se contente de la section nécessaire pour une simple voie, l'économie sera un peu plus considérable.

Si l'on perce deux galeries, nous croyons qu'il y aurait avantage à augmenter la distance de 17 mètres admise au Simplon entre les axes de ces deux galeries et qui paraît un peu faible à cause des dislocations produites dans la roche par les coups de mine. Nous croyons qu'il conviendrait de porter cette distance à 20 ou même 25 mètres.

Il y aurait aussi avantage, pour faciliter l'écoulement des eaux, à tenir le seuil de la galerie II légèrement au-dessous de celui de la galerie I.

Perforatrices. — Il serait téméraire de prétendre qu'on n'arrivera pas à construire une perforatrice mécanique beaucoup plus perfectionnée que la perforatrice hydraulique Brandt. Ce n'est cependant pas très probable, car cet engin paraît avoir réalisé, comme nous l'avons expliqué, de très sérieux perfectionnements. De plus, nous croyons que son emploi est économique. Dans son mémoire relatif aux travaux du tunnel de l'Arlberg, M. Revaux, que nous avons déjà cité, compare, au point de vue de la dépense de force, le forage des trous de mine à la main et le forage au moyen de la perforation à air comprimé, et sa conclusion est que ce dernier système paraît plus coûteux.

Or, il semble qu'avec la perforatrice hydraulique la conclusion doive être différente. Si nous nous reportons, en effet, aux moyennes que nous avons calculées d'après les renseignements fournis par les rapports trimestriels, nous voyons que le mètre cube de déblai de la galerie d'avancement revient en moyenne à 30 fr. 80, tandis que pour la galerie de faite exécutée à la main, le prix moyen est de 51 fr. 03. A la vérité, cette dernière galerie a une section un peu plus faible que celle de la galerie d'avancement (5 mètres contre 6) et les conditions du travail sont un peu plus défavorables, ce qui doit entraîner une légère augmentation du prix du mètre cube. En outre, dans la dépense de la force motrice pour les perforatrices, nous n'avons pas fait entrer en ligne de compte une part proportionnelle de la dépense pour l'établissement et l'entretien de la chute d'eau et des turbines. Mais cette dernière dépense, rapportée au mètre cube de déblai, serait bien inférieure à l'écart de 20 francs par mètre cube existant entre les deux galeries, comme on peut s'en convaincre en supposant la force motrice fournie par une machine à vapeur, au lieu d'une chute d'eau.

Il faudrait, dans ce cas, pour la mise en marche de trois perforatrices, une machine de 100 chevaux. La dépense du cheval-heure

peut être évaluée à 0 fr. 06, ce qui donnerait, pour 100 chevaux et pour 24 heures, 144 francs. L'avancement moyen par jour étant de 4^m,75 pour un seul côté, ce qui correspond à un cube de 28^m,50, la dépense par mètre cube serait de 5 francs seulement. Même en doublant cette évaluation, on ne comblerait que la moitié de l'écart constaté. L'expérience du Simplon prouve donc que l'emploi de la perforatrice Brandt pour le percement de la galerie d'avancement donne un prix de revient inférieur à celui qui résulterait du forage à la main, sans parler bien entendu de l'économie produite par la rapidité d'exécution. Ce résultat conduit à une conclusion pratique importante que nous ferons ressortir plus loin.

Explosifs. — L'entreprise du Simplon a fait de nombreux essais pour substituer aux cartouches de dynamite des cartouches d'air liquéfié, en employant de la farine comme support du liquide. Malheureusement, la combustion de ces cartouches était accompagnée de la production d'une certaine quantité d'oxyde de carbone, et il en résultait des inconvénients graves pour la santé des ouvriers, de sorte qu'on a dû renoncer à ces essais et revenir à l'emploi exclusif de la dynamite. Peut-être quelque inventeur ingénieux trouvera-t-il un moyen pratique pour employer l'air liquide comme explosif, et il en résultera une économie considérable. Le prix de la fabrication de l'air liquide est en effet très bas ; avec une machine Linde, produisant 1.100 kilogrammes par jour, le kilogramme ne revient qu'à 0 fr. 125. Si la puissance explosive des cartouches d'air liquide était la même que celle des cartouches de dynamite, ce qui n'est pas invraisemblable, puisque un volume d'air liquide donne 800 volumes de gaz, le prix du nouvel explosif ne serait pas le dixième de celui de la dynamite. Il en résulterait une économie importante, car la dépense de dynamite s'est élevée en moyenne, au Simplon, à 150 francs environ par mètre courant de tunnel à simple voie.

Chargement des déblais au front d'attaque. — L'entreprise du Simplon a essayé, comme nous l'avons expliqué, un système de chargement auquel elle a donné le nom de *marinage hydraulique*.

Mais ces essais n'ont pas réussi et la quantité considérable d'eau qu'exige l'emploi de ce système semble être un obstacle sérieux à sa réussite. Toutefois, si la température de la roche était assez peu élevée pour que la réfrigération par l'eau fût inutile, le système dont il s'agit pourrait donner de bons résultats puisque, employé à titre d'essai en dehors du tunnel, il avait été reconnu susceptible d'applications utiles.

Transports. — L'organisation des transports a assez notablement varié dans le cours de l'exécution des travaux du Simplon.

On a d'abord adopté plusieurs largeurs de voie, dont la plus petite était employée près du front d'attaque. Mais on a reconnu que cette diversité était nuisible et l'on s'est décidé à prolonger jusqu'aux fronts d'attaque la voie de 0^m,80 employée dans la partie terminée du tunnel I et de la galerie parallèle. Cette simplification a pu être appliquée sans difficulté sérieuse.

En ce qui concerne les moteurs, la pratique suivie a aussi varié. On a, pendant longtemps, employés des chevaux dans la galerie d'avancement. Mais on a fini par y renoncer pour employer des moteurs mécaniques, sauf dans la partie voisine des fronts d'attaque. On a employé comme moteurs des locomotives à vapeur, depuis l'entrée du tunnel jusqu'à la station, et au delà des moteurs à air comprimé. Ces deux systèmes de moteurs présentent des inconvénients sérieux. Les locomotives à foyer augmentent sensiblement la température à l'intérieur du tunnel et, de plus, elles produisent en abondance des gaz irrespirables. Quant aux locomotives à air comprimé, telles qu'elles ont été employées au Simplon, elles présentent l'inconvénient d'exiger des réchauffeurs mobiles encombrants. Mais c'est là un inconvénient auquel il est facile de remédier.

La substitution de locomotives électriques aux locomotives à foyer est tout indiquée pour la partie du tunnel qui est achevée. Ces locomotives sont devenues aujourd'hui d'une construction et d'un emploi tout à fait pratiques, et cette substitution ne peut certainement soulever aucune objection grave.

Il n'en serait pas de même pour la partie du tunnel en construc-

tion, par suite de la difficulté d'installer les fils conducteurs d'une manière commode et exempte de tout danger. Mais les locomotives à air comprimé peuvent être conservées pour cette partie en employant l'électricité pour réchauffer l'eau à travers laquelle on fait passer l'air comprimé avant de le faire agir sur les pistons moteurs. Ces locomotives effectueraient leur chargement d'air comprimé à la station établie vers la fin de la partie terminée du tunnel et, en même temps, le réchauffement se produirait par une simple prise de courant, au moyen d'un dispositif facile à imaginer et à appliquer.

L'emploi de locomotives électriques pour la partie achevée du tunnel et de locomotives à air comprimé, avec réchauffeur électrique, pour la partie située au delà, permettrait, à notre avis, d'effectuer les transports dans de très bonnes conditions et constituerait un progrès sérieux.

Quant aux chevaux, dont l'emploi a été conservé du côté d'Iselle, quoique d'une manière restreinte, il semble qu'il y aurait avantage à y renoncer complètement en adoptant, pour les locomotives à air comprimé, des dimensions leur permettant de s'avancer à proximité du front d'attaque et en effectuant les manœuvres à la main pour le petit parcours restant, ainsi qu'on l'a fait, du reste, du côté de Brigue.

En ce qui concerne la voie, nous croyons qu'il y aurait avantage à ce qu'elle fût facilement démontable, comme celle du système Decauville ou de tout autre analogue, au moins dans la partie où les voies doivent subir des changements, c'est-à-dire à partir de la station inclusivement jusqu'au front d'attaque.

Eclairage des chantiers. — Cet éclairage s'effectue, sur les travaux du Simplon, au moyen de lampes de mineurs, qui ont l'inconvénient de vicier l'air, d'élever la température et d'éclairer assez mal. Il serait possible, croyons-nous, d'employer l'éclairage électrique, pour lequel la disposition des conducteurs destinés à amener le courant présente moins de difficultés que pour la traction. Les lampes de mineurs seraient conservées pour le cas où l'éclairage électrique se trouverait interrompu.

Les conclusions générales à tirer des observations qui précèdent sont assez évidentes. Tout d'abord, on voit qu'à la condition d'introduire dans le tunnel un volume d'air suffisant et de rafraîchir cet air, si la température de la roche est trop élevée, de manière à créer une atmosphère dont la température ne dépasse pas sensiblement 30°, le travail des ouvriers s'effectue dans des conditions presque aussi faciles que dans les tunnels ordinaires. Or, l'expérience du Simplon a montré que l'introduction, et même la réfrigération, de cet air, ne présentent pas des difficultés pratiques bien considérables. On peut donc dire que, grâce à l'expérience résultant des travaux du tunnel du Simplon, l'exécution des grands tunnels ne présente pas des difficultés techniques beaucoup plus grandes que celle des tunnels ordinaires. En second lieu, du fait que l'exécution d'une galerie d'avancement au moyen de la perforation mécanique est moins coûteuse, ou tout au moins n'est pas plus coûteuse, que l'exécution d'une galerie d'avancement à la main, on peut conclure que la dépense du mètre courant d'un grand tunnel est comparable à celle du mètre courant d'un tunnel ordinaire, placé dans les mêmes conditions au point de vue de la nature de la roche et de l'abondance des eaux, augmentée des frais de ventilation et de réfrigération de l'air de la ventilation, s'il y a lieu, et en outre des frais supplémentaires résultant de l'allongement des transports, frais qui ne sont d'ailleurs pas bien considérables.

Ceci signifie, en réalité, que nous ne sommes pas au bout de l'abaissement du prix d'exécution des grands tunnels, et que ceux de ces ouvrages qui seront exécutés dans l'avenir coûteront moins cher que leurs devanciers, toute réserve étant faite, bien entendu, pour les cas exceptionnels.

A la vérité, il y a une circonstance qui semble s'opposer à une réduction notable de la dépense, c'est le défaut de concurrence pour l'entreprise des longs tunnels. On ne peut songer, en effet, à procéder, pour ces grands ouvrages, à une adjudication publique, à laquelle seraient admis les entrepreneurs agréés pour les petits tunnels.

Toutefois, le défaut de concurrence n'est pas absolu et il sera fa-

cile, au contraire, de trouver plusieurs entrepreneurs, ou Sociétés d'entreprise, avec lesquels on pourra traiter, soit de gré à gré, soit par une adjudication restreinte, à la condition que l'on renonce à mettre à la charge de l'entreprise toutes les chances défavorables pouvant résulter de ce que les conditions internes du massif à percer ne peuvent pas être prévues à l'avance avec une entière certitude. C'est là un point important sur lequel quelques explications sont nécessaires.

Nous avons vu que le contrat pour l'exécution du tunnel du Simplon constituait un forfait rigoureux et que les cas de force majeure eux-mêmes ne donnaient droit, pour l'entreprise, qu'à une simple prorogation du délai d'exécution. Ces conditions étaient probablement nécessaires pour décider les actionnaires du Jura-Simplon à approuver l'exécution du tunnel et, à ce point de vue, elles peuvent se comprendre. Mais, il est bien évident qu'un forfait aussi rigoureux présente de graves inconvénients. L'entreprise est obligée de majorer ses évaluations de dépenses pour se prémunir contre les chances défavorables laissées à sa responsabilité et, malgré cette majoration, l'administration qui fait exécuter le travail n'est pas assurée qu'elle n'aura rien à payer au delà du montant du forfait convenu. L'expérience du Simplon l'a bien prouvé, puisque, par un acte de haute équité, le gouvernement fédéral a consenti à accorder à l'entreprise une allocation supplémentaire importante. En outre, avec un forfait rigoureux, le droit d'intervention et de contrôle de l'administration se trouve trop réduit, et, si les ingénieurs appelés à exercer ce contrôle jugent que certaines mesures adoptées par l'entreprise sont fâcheuses, ils ne peuvent même pas en faire l'observation.

Il convient donc de renoncer, pour l'exécution des grands tunnels, à l'adoption d'un forfait absolu. Le forfait doit être basé sur des hypothèses déterminées quant à la constitution du massif, à la température de la roche, à l'abondance des eaux, etc... et l'on doit admettre nettement, si ces hypothèses ne sont pas vérifiées, le droit de l'entreprise à être indemnisée pour les augmentations de dépenses qui pourront résulter de ce désaccord. Il en est de même pour les cas de force majeure.

La suppression du forfait absolu entraîne une conséquence importante : c'est qu'il n'y a plus de raison d'exiger de l'entreprise, sous forme de cautionnement ou sous toute autre forme, une mise de fonds énorme, qui se traduit nécessairement par une augmentation du forfait. La responsabilité de l'entreprise étant limitée à celle qui résulte des hypothèses admises, il convient de se contenter d'une mise de fonds modeste.

Si l'on adopte cette double mesure, c'est-à-dire si l'on écarte du forfait la responsabilité des événements tout à fait imprévus, qui incombe équitablement au maître de l'ouvrage, et si l'on ramène à des proportions modérées la mise de fonds de l'entreprise, il ne sera pas difficile de trouver des entrepreneurs ou des Sociétés susceptibles de se charger de l'exécution des travaux. On introduira ainsi, dans les conditions d'exécution des grands tunnels, un élément efficace de concurrence, et il n'est pas douteux que cette modification aura pour conséquence une diminution sensible des prix.

Nous croyons aussi devoir signaler la convenance d'adopter, pour le profil en long des grands tunnels, des déclivités telles que l'on ne soit pas obligé de suspendre les travaux d'un côté, ainsi

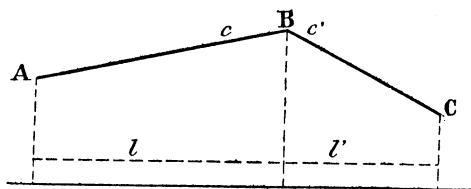


Fig. 15.

que cela est arrivé au Simplon. S'il y a, comme c'est le cas ordinaire, une différence d'altitude assez considérable entre les deux têtes A et C, il faut que la longueur l de la faible rampe soit sensiblement plus grande que la longueur l' de la forte rampe. Dans ces conditions, lorsque les fronts d'attaque ont atteint la même altitude, par exemple en c et c' , on peut modifier le profil de la partie restante de manière à pouvoir continuer la perforation mécanique jusqu'à la rencontre des galeries.

Au Simplon, la partie en rampe de 0,002 (côté de Brigue) n'avait

Différence en moins sur la longueur du tunnel..	0 ^m 790
Différence en plus sur la hauteur du côté Nord.	0 ^m 087
Divergence dans la direction des deux axes	0 ^m 202

L'axe du côté Nord présente, par rapport à l'axe mathématique, une déviation de 0.110 vers l'Ouest et l'axe du côté Sud, une déviation de 0.092 vers l'Est.

Ces différences si faibles montrent avec quel soin ont été effectuées les opérations géodésiques qui ont précédé et accompagné l'exécution des travaux.

LÉGENDE DE LA FIG. 3

